
TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií

Studijní program: B2612 – Elektrotechnika a informatika
Studijní obor: 2612R011 – Elektronické informační a řídicí systémy

**Měření svěrných sil mezi brzdovými třecími
segmenty**

Camping force with pads

Bakalářská práce

Autor:	Tomáš Vala
Vedoucí práce:	Doc. Ing. Miroslav Svoboda
Konzultant:	Ing. Petr Novák, Lucas Autobrzdý

V Liberci 18. 5. 2007

Prohlášení

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé bakalářské práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé bakalářské práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom(a) toho, že užít své bakalářské práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Bakalářskou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum

Podpis

Anotace

Úkolem této práce bylo seznámení se s používanými systémy, které měří svěrné síly brzdových třecích segmentů, a provést rozbor jejich kladů a nedostatků. Pro analýzu byla použita data, která byla získána při různých zkouškách ve firmě Lucas Autobrzdy s.r.o. Jablonec n. N. Dále je rozebráno koncepční řešení pro nový měřicí systém, zahrnující mechanickou část (instalace snímačů s ohledem na minimální tloušťku brzdových kotoučů) a měřicí řetězec (snímače, zpracování signálů, karta pro sběr dat). Jednotlivé části navrženého systému byly poté porovnány mezi sebou a ohodnoceny.

Annotation

The aim of this work was the introduction to common systems, which measure their clamping force with pads, and the implementation of their accomplishments and deficiencies. The data used for the analysis had been gathered during various tests in company Lucas Autobrzdy s.r.o. Jablonec n. N. Next, the conceptual solution for a new measuring system including a mechanic part (installation of sensors with regard on minimal thickness of brake wheels) and measuring chains (sensors, signals processing, card for data collection). The separate parts of designed system were compared to each other and evaluated.

Obsah

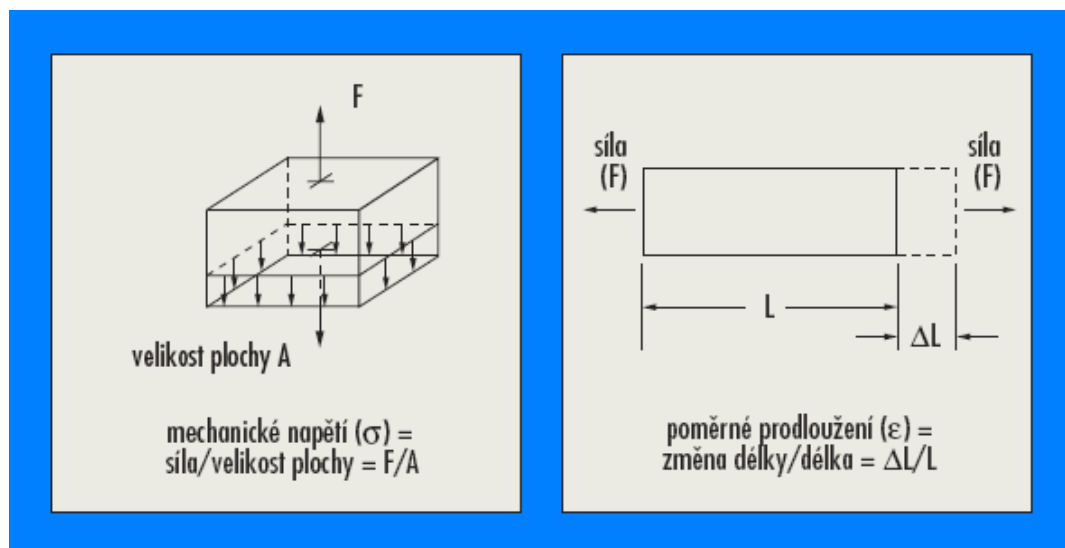
1. Úvod	6
2. Snímače poměrného prodloužení	7
2.1. Konstrukce snímačů	11
2.1.1. Spojné tenzometry	14
2.2. Měřicí obvody	16
2.2.2. Chevronův můstek	18
2.2.3. Ohmův obvod ve čtyřdrátovém zapojení	19
2.2.4. Obvody pracující s konstantním proudem	21
2.3. Aplikace a instalace	22
2.3.1. Stínění	22
2.3.2. Stínění a ochrana přístrojů	23
2.3.3. Účinky signálního vedení	23
2.3.4. Teplota a faktor měřky	25
2.3.5. Zdánlivé a poměrné prodloužení	25
2.3.6. Přístup k řešení stability	26
2.3.7. Konstrukce převodníků	26
2.3.8. Diagnostika instalací	28
3. Návrh koncepčního řešení	30
3.1. Zesilovače SCC-SG04	31
3.2. Blokové schéma zapojení zesilovačů SCC-SG04	31
3.3. Modul celkové sběrnice NI SC-2345	32
3.4. Karta NI PCI-6036E	33
3.5. Propojovací kabel NI SH-68-68EP	34
3.6. Senzory LCMKD-5KN	35
4. Realizace kompletu	37
4.1. Kompletní schéma zapojení	37
4.2. Měřicí přípravek	38
5. Měření	41
5.1. Umístění celého brzdového ústrojí na stoličce	41
5.2. Rozmístění tenzometrů	41
5.3. Zatížení tenzometrů	42
6. Závěr	45

1. Úvod

V současné době probíhá měření svěrných sil mezi brzdovými destičkami pomocí jednoho tenzometru. Tato metoda je značně přesná, ale má své limity, protože při stlačování brzdového kotouče brzdovými destičkami dochází u brzdového třmenu k jeho ohybu. Ohyb je sice minimální a okem nepostřehnutelný nicméně pomocí laboratorních přístrojů změřitelný. Tento ohyb způsobuje, že síla vyvozená brzdovým válcem není zcela přenesena na osu tenzometru, ale dochází zde ke špatně měřitelné úhlové odchylce na tenzometru. Tenzometry mají od výrobce deklarovanou přesnost měření síly ve svislé ose, ale už nikde nespecifikují přesnost měření, když dojde k úhlové odchylce od svislé osy tenzometru. Tento problém v této práci řešíme měřením svěrných sil mezi brzdovými destičkami pomocí čtyř tenzometrů, vhodně rozmístěnými mezi brzdovými destičkami. V této práci jsme se pokoušeli zachovat obě brzdové destičky a tenzometry umístit mezi ně a nahradit tedy jím brzdový kotouč, ale to se nám nepodařilo. Důvod je jednoduchý, přípravek pro měření svěrných sil musí být kompatibilní i s více druhy brzd, to znamená, že se musí dát umístit i do poměrně malých třmenů zadních brzd osobních automobilů a to je výrobně značný problém. Protože při svěrných silách při kterých měříme je potřeba dodržet značnou tuhost měřícího přípravku. Jinak může dojít k jeho kroucení a tím zaneść do měření značné nepřesnosti. A proto jsme měření provedli jen s jednou brzdovou destičkou. Druhá destička byla nahrazena přípravkem s tenzometry.

2. Snímače poměrného prodloužení:

Působí-li na nepohybující se těleso síly, vyvolávají v tělese mechanická napětí a v tělese lze zjistit poměrná prodloužení. Mechanické napětí je definováno pomocí vyvolaných reaktivních sil, které vznikají a působí uvnitř tělesa, poměrné prodloužení je definováno jako deformace a změna tvaru tělesa. Pro rovnoměrné rozložení vyvolaných vnitřních reaktivních sil lze mechanické napětí určit jako podíl velikosti síly (F) velikostí plochy (A), na kterou síla působí (Obrázek 1-1).



Obr. 1-1 – snímač poměrného prodloužení

Poměrné prodloužení je definováno jako velikost deformace, připadající, po přivedení zátěže na těleso, na jednotku délky tělesa. Poměrné prodloužení se vypočítá dělením celkové změny délky tělesa při zatížení tělesa délkou (L) nezatíženého tělesa. Typické hodnoty poměrného prodloužení jsou menší než 0,005 mm/mm. Poměrné prodloužení se proto často vyjadřuje v jednotkách pro poměrné mikroprodloužení.

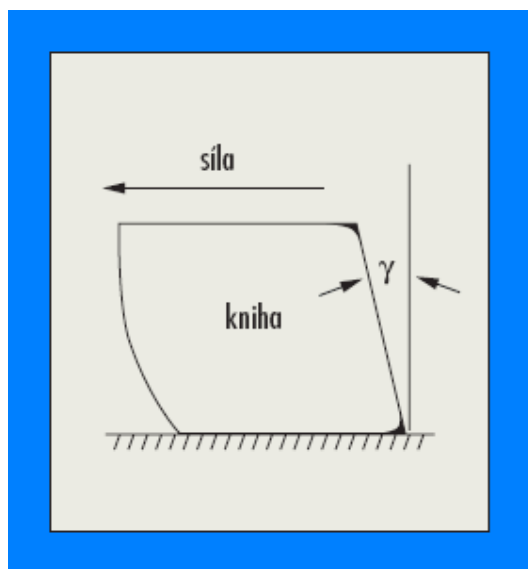
Poměrné mikroprodloužení může být tahové (natažení tělesa) nebo tlakové (stlačení tělesa). Měří se obvykle měrkami pro měření poměrného prodloužení, měřidly poměrného prodloužení, tenzometrickými měrkami (tenzometry). První kdo zveřejnil, že kovové vodiče vykazují při poměrném prodloužení změnu svého elektrického odporu byl v r. 1856 Lord Kelvin. V praktických aplikacích se tento jev uplatňuje od třicátých let 20. Století.

V principu pracují všechny měrky pro měření poměrného prodloužení tak, že

převádějí mechanický pohyb na elektrický signál. Změna kapacity, indukce nebo rezistance snímače je přímo úměrná hodnotě poměrného prodloužení, měřeného měrkou. Je-li aplikováno poměrné prodloužení na drát, drát se mírně prodlouží a jeho průřez se zmenší. To má za následek změnu odporu (R) která je přímo úměrná citlivosti odporu drátu (S) na poměrné prodloužení. Citlivost měrky na poměrné prodloužení se také nazývá faktor měrky (GF), Gauge Factor. Ideální tenzometr by měnil svůj odpor pouze v důsledku deformace povrchu, na který je připevněn. Ve skutečných aplikacích ale ovlivňují hodnotu měřeného odporu teplota, vlastnosti materiálu, lepidlo kterým je tenzometr připevněn k povrchu, stabilita kovu. Vzhledem k tomu, že většina materiálů nemá stejné vlastnosti ve všech směrech, je pro úplnou analýzu problému znalost pouze axiálního, souosého, poměrného prodloužení nedostatečná. Je také třeba měřit zkos ve smyku (zkos ve střihu), veličinu analogickou poměrnému prodloužení, Poissonovo poměrné prodloužení (kombinace poměrného prodloužení při protažení a zúžení tělesa), poměrného prodloužení v ohybu (poměrné prodloužení vyvolané ohybovým momentem), veličiny analogické poměrnému prodloužení, a zkos ve smyku při torzi (zkos ve smyku při krutu), veličinu analogickou zkosu ve smyku. Každá z nich vyžaduje jinou konstrukci nebo sestavu tenzometru.

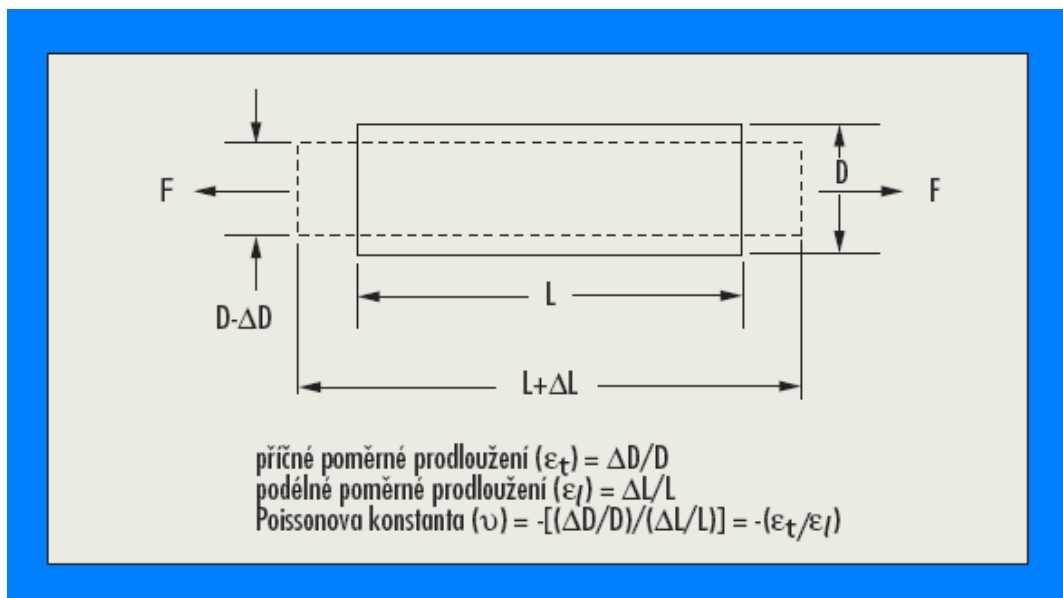
Zkos ve smyku, (zkos ve střihu), vyjadřuje situaci, kdy se těleso působením mechanického napětí deformuje úhlově. Představme si, že síla působí na horní pravou hranu silné knihy ležící na stole. Způsobuje, že kniha dostává jakýsi lichoběžníkový tvar (Obrázek 1-2). Zkos ve smyku (zkos ve střihu), může být v tomto případě vyjádřený pomocí úhlu, měřeného v radiánech, daného vertikální osou y a polohou hrany knihy po deformaci. Zkos ve smyku je rovný tangente tohoto úhlu.

Poissonovo poměrné prodloužení vyjadřuje situaci, kdy v napjaté tyči dochází jak ke ztenčení tyče, tak k jejímu prodloužení (Obrázek 1-3). Poissonovo poměrné prodloužení je definováno jako záporně vzatý poměr poměrného prodloužení v příčném, transverzálním, směru (poměrné prodloužení je způsobené zmenšením poloměru tyče k poměrnému prodloužení v podélném směru. Se zmenšujícím se poloměrem drátu a rostoucí délkou drátu roste i elektrický odpor drátu.



Obr. 1-2 – ohyb knihy

Poměrné prodloužení v ohybu (poměrné prodloužení vyvolané ohybovým momentem), se vypočítá tak, že se určí vztah mezi velikostí síly a mezi velikostí ohybu, který tato síla vyvolává. Zkos ve smyku při torzi (zkos ve smyku při krutu se neměří tak často jako jiné typy poměrného prodloužení) se měří tehdy, když je třeba určit poměrné prodloužení, vzniklé kroucením. Zkos ve smyku při torzi se vypočítá dělením torzního mechanického napětí modulem pružnosti ve smyku.



Obr. 1-3 – Poissonovo poměrné prodloužení

Dále je zde popsán teoretický rozbor silových veličin.

Síla je veličina, schopná měnit velikost, rozměr, tvar nebo pohyb určitého tělesa. Síla je měřitelný vektor, a jako taková má svůj směr a svoji velikost. Jednotkou velikosti síly je v SI soustavě jeden newton, v britsko-americké soustavě se síla měří v librách. Nachází-li se těleso v pohybu, lze energii jeho pohybu kvantifikovat součinem jeho hybnosti a jeho rychlosti (hybnost tělesa je daná součinem hmotnosti tělesa a jeho rychlosti). Pokud je těleso volné, má možnost se pohybovat, mění se působením síly rychlost tělesa. V přírodě se setkáváme se čtyřmi základními typy sil. Jsou to gravitační síla, magnetická síla, silné jaderné síly a slabé jaderné síly. Nejslabší z uvedených sil je síla gravitační. Je to také síla, která se nejsnadněji pozoruje, protože působí na všechna tělesa a je vždy přitažlivá, působí přitom na nekonečnou vzdálenost. Velikost gravitační síly se vzdáleností klesá, síla ale zůstává vždy měřitelnou. Rovnovážné polohy tělesa lze tedy dosáhnout pouze tehdy, je-li působení přitažlivé gravitační síly vykompenzováno nějakou jinou silou, příkladem je vzhůru působící síla, kterou působí zemský povrch na naši nohu. Tlak je dán podílem síly, působící na určitý povrch, a velikosti tohoto povrchu. Tlak se měří v jednotkách síly dělených jednotkami plochy: pounds per square inch, (psi), libry na čtvereční palec nebo v soustavě SI v newtonech na čtvereční metr, tj v pascálech (Pa). Proces, při kterém na určitý objekt působí vnější tlak s cílem snížit objem objektu se nazývá komprese. Většina pevných látek a kapalin je prakticky nestlačitelná. Plyny jsou stlačitelné. První zákon o plynech, tzv. Boyleův zákon, říká, že tlak a objem plynu jsou při stálé teplotě vzájemně nepřímo úměrné : $PV = k$, kde P je velikost tlaku, V je velikost objemu a k je konstanta úměrnosti. Druhý zákon o plynech, tzv. Charlesův zákon, říká, že objem plynu při stálém tlaku je přímo úměrný absolutní teplotě plynu: $V = kT$, kde T je hodnota absolutní teploty. Podle třetího zákona o plynech je tlak plynu při stálém objemu přímo úměrný absolutní teplotě plynu: $P = kT$. Kombinací a sloučením těchto tří zákonů získáváme stavovou rovnici pro ideální plyn: $PV = kT$. Tato přibližná rovnice velmi dobře vyhovuje pro většinu plynů při relativně malých tlacích (tlacích, které nejsou blízké k tlakům při kterých dochází ke zkapaňování plynů) a relativně vysokých teplotách (teplotách, které nejsou blízké k teplotám, při kterých dochází ke kondenzaci plynů).

2.1. Konstrukce snímačů:

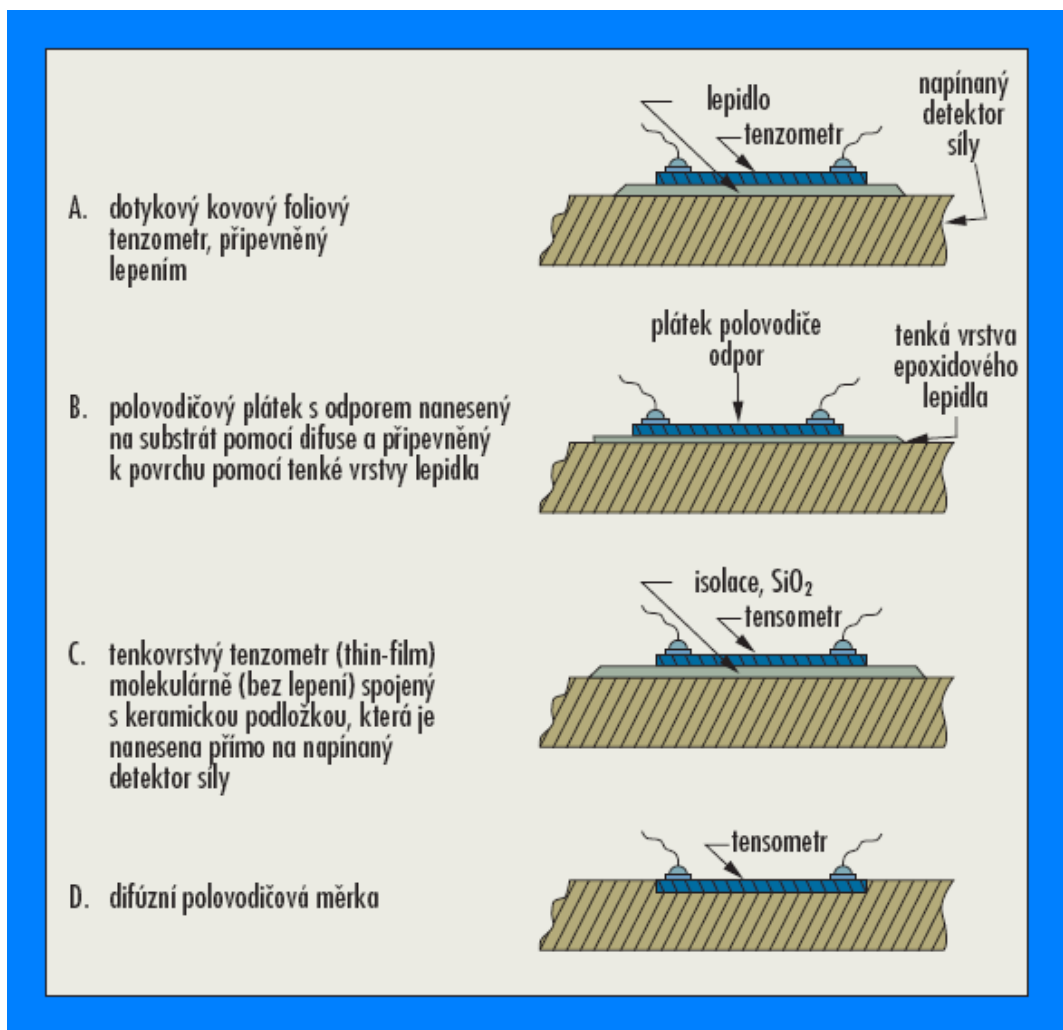
Pro měření deformace tělesa lze použít mechanické, optické, akustické, pneumatické a elektrické prostředky. První snímače poměrného prodloužení byly mechanické přístroje, které měřily poměrné prodloužení měřením změny délky, porovnáním délky namáhaného tělesa s původní délkou tělesa. Příkladem je extenzometr, průtahoměr, přístroj který pomocí soustavy pák zvětšuje velikost poměrného prodloužení na hodnotu, kterou je možno odečíst. Obecně je však možno říci, že mechanická zařízení mají sklon k malé rozlišovací schopnosti, že jsou rozměrná a že se s nimi obtížně pracuje.

Optické snímače jsou citlivé a jsou přesné, jsou ale křehké a choulostivé a v průmyslových aplikacích nejsou příliš žádané. Pro měření používají interferenční proužky generované optickými rovinami. Optické snímače pracují nejlépe v laboratorních podmínkách.

Z fyzikálních veličin, které se mění úměrně velikosti poměrného prodloužení je ve snímačích nejčastěji používán elektrický odpor. Byly zkonstruovány a jsou k dispozici i tenzometrické snímače založené na změně kapacitance a na změně indukčnosti. Použití těchto snímačů v aplikacích je však omezeno jejich citlivostí na vibrace, požadavky na montáž a jejich obvodovou náročností. Fotoelektrické snímače používají světelný paprsek, dvě přesné jemné mřížky a detektor s fotobuňkou, generují proud, který je úměrný měřenému poměrnému prodloužení. Délka měřky může být u těchto snímačů menší než 1,6 mm, snímače jsou ale drahé a také křehké a choulostivé.

První spojný (mechanicky manuálně připevňovaný) drátový tenzometr byl vyvinutý v roce 1938. Kovový tenzometr fóliového typu sestává z mřížky tvořené vláknem drátu (odporu, o síle přibližně 0.025 mm, přilepené tenkou vrstvou epoxidového lepidla přímo na povrch napínaného tělesa (Obrázek 1-4).

Působí-li na těleso síla, je změna délky povrchu tělesa přenášena na odpor tenzometru. Odpovídající poměrné prodloužení se měří pomocí měření elektrického odporu foliového tenzometru. Odpor tenzometru lineárně závisí na jeho poměrném prodloužení. Foliová membrána a lepidlo, kterým se tenzometr připevňuje na povrch musí být pro přenos poměrného prodloužení vzájemně přizpůsobeny, lepidlo musí také sloužit jako elektrický izolant mezi mřížkou fólie a povrchem.



Obr. 1-4 - tenzometry

Při výběru tenzometru je nutno mít na zřeteli nejen charakteristiky snímače vzhledem k poměrnému prodloužení, ale také jeho stabilitu a citlivost na teplotní změny. Většina materiálů, které jsou pro tenzometry maximálně vhodné vzhledem k jejich citlivosti na poměrné prodloužení, jsou naneštěstí také citlivá na teplotní změny a mají sklon měnit svůj odpor se stárnutím. Toto nemusí být významné při měřeních, která trvají krátkou dobu. U průmyslových dlouhotrvajících nepřetržitých měření je ale nutno do řešení kompenzaci teplotních vlivů a kompenzaci driftu zahrnout.

Každý materiál, který se používá pro dráty v tenzometrech, má své vlastní charakteristiky: faktor měrky, odpor, teplotní koeficient faktoru měrky, teplotní koeficient odporu a stabilitu. Mezi typické materiály pro dráty patří konstantan (slitina

mědi a niklu), nichrom (slitina niklu a chromu), slitiny platiny (obvykle s wolframem), isoelastic (slitina niklu a železa), a slitiny typu karma (slitina niklu a chromu). Používají se fólie s polovodičovými materiály. Nejvíce používanými slitinami pro výrobu tenzometrů jsou slitiny mědi a niklu a slitiny niklu a chromu.

Uprostřed padesátých let 20. Století objevili vědci v Bell Laboratories piezorezistivní vlastnosti germania a křemíku. I když tyto materiály vykazují značnou nelinearitu a teplotní citlivost, mají faktor měřky více než padesátkrát větší a citlivost více než stokrát větší než materiály používané v tenzometrech s kovovými dráty nebo kovovými foliemi.

Křemíkové, silikonové, plátky jsou také pružnější než kovové. Po uvolnění poměrného prodloužení se lépe a přesněji vracejí do původního tvaru. Okolo roku 1970 byly vyvinuty, pro automobilový průmysl, první polovodičové (křemíkové) tenzometry. Na rozdíl od ostatních typů tenzometrů využívají polovodičové tenzometry piezoelektrický jev, který se uplatňuje na křemíku nebo na germaniu. Měřená změna odporu nezávisí na poměrném prodloužení, ale závisí na mechanickém napětí. Dotykový polovodičový tenzometr je tvořený plátkem s odporem naneseným difuzní technikou přímo do křemíkového substrátu. Plátek obvykle není vybavený výztuhou nebo ochranou a protože se pro jeho přilepení na napínaný povrch používá pouze malé vrstvy epoxidového lepidla, je třeba plátek připevňovat s velkou opatrností (Obrázek 1-4B). Rozměr tenzometru je mnohem menší a jeho cena je mnohem nižší než je tomu u kovových foliových tenzometrů. Pro přilepení spojných (mechanicky manuálně připevňovaných) polovodičových snímačů se používá stejné epoxidové lepidlo, jaké se používá pro přilepení foliových tenzometrů.

Jednoznačnou výhodou polovodičových snímačů oproti kovovým foliovým snímačům je jejich velký odpor a velká citlivost, jejich nevýhodou je větší citlivost na teplotu a sklon k driftu. Další nevýhodou polovodičových snímačů je, že je u nich závislost odporu na poměrném prodloužení nelineární, jejich statická charakteristika se odchyluje od přímky o 10 % až 20 %. Je-li měřicí technika vybavena řídicím počítačem, lze tuto nevýhodu kompenzovat softwarem.

Další vylepšení přináší tenzometrický tenkovrstvý tenzometr, tzv. tenzometr typu thin-film, tento tenzometr nevyžaduje pro spojně připevnění lepení (Obrázek 1-4C). Snímač se vytvoří tak, že se na kovový, mechanickým napětím namáhaný, povrch

nejdříve nanese elektrická izolační podložka, (obvykle keramický izolant) a poté se na tuto izolační podložku nanese vlastní tenzometrická měrka. K molekulárnímu spojení těchto materiálů se používá vakuové nanášení nebo pokovování rozprašováním.

Protože je tenkovrstvý (thin-film) tenzometr připevněný na povrch vzorku molekulárně, je jeho instalace mnohem stabilnější a hodnoty odporu vykazují menší drift. Další výhodou je, že detektor mechanického napětí může být kovová membrána nebo svazek s nanesenou vrstvou keramické izolace.

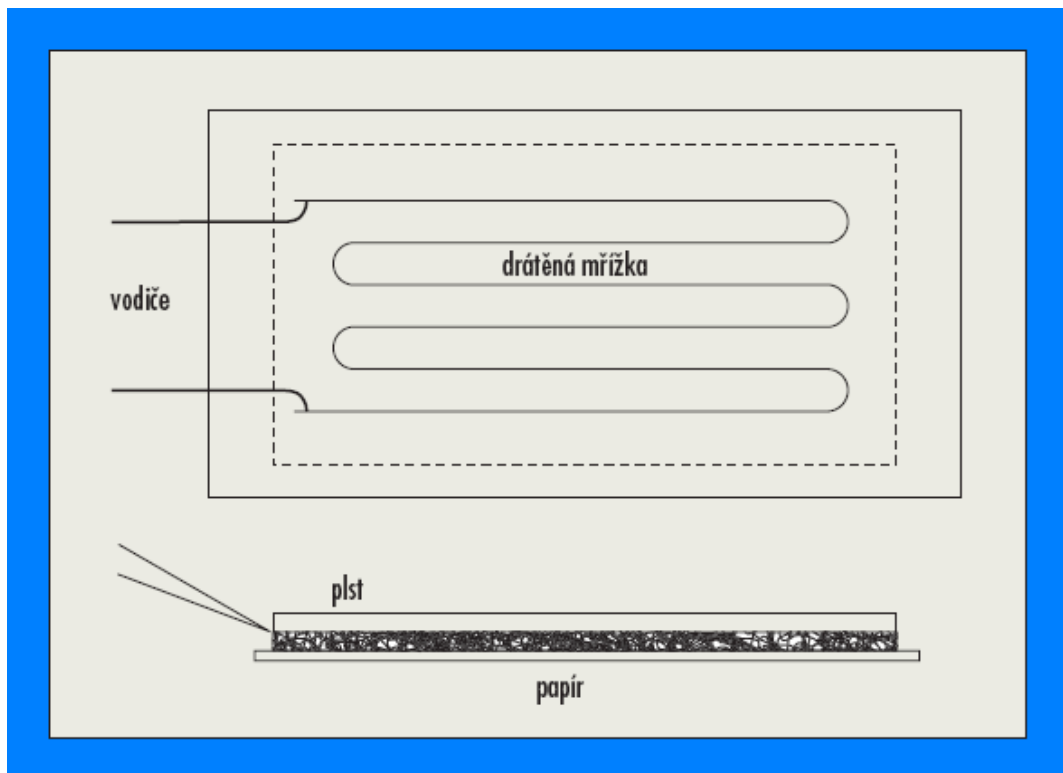
Dalším vylepšením v technice a technologii výroby tenzometrů jsou difúzní polovodičové tenzometry. Tyto tenzometry nevyžadují připevňovací prostředky. Vyloučením těchto připevňovacích prostředků se také vylučují chyby, způsobené jejich creepem (tečením pevné fáze) a jejich hysterezí. Difúzní polovodičové tenzometry využívají pro provedení molekulární vazby a nanesení odporových elementů fotolitografickou maskovací techniku a difúzi boru v pevné fázi. Elektrické vodiče se připojují přímo na základní měrku (Obrázek 1-4D).

Použití difúzních polovodičových tenzometrů je omezeno na aplikace, kde nejsou vysoké teploty, tenzometry vyžadují realizovat teplotní kompenzaci. Difúzně nanášené polovodiče jsou také často používány ve snímačích pro měření tlaku. Jsou malé, levné, přesné, měření snímači jsou opakovatelná. Snímače mají velký měřicí rozsah a poskytují velký výstupní signál. Jejich omezením je citlivost na změny okolního prostředí, tato ale může být v případě použití inteligentních měřících systémů kompenzována.

Celkově lze shrnout, že ideální tenzometr je měrka, která je rozměrově a hmotnostně malá, levná, která se snadno připevňuje a je vysoce citlivá na měřené poměrné prodloužení a necitlivá na změny teploty okolí nebo teploty měřeného objektu.

2.1.1. Spojné (mechanicky manuálně připevňované) tenzometry:

Spojné polovodičové tenzometry jsou schématicky uvedeny na obrázku 1-4A a na obrázku 1-4B. Tato zařízení reprezentují oblíbenou metodu měření poměrného prodloužení. Tenzometr sestává z mřížky velmi jemného drátu, folie nebo polovodičového materiálu, která je mechanicky připevněna k napínanému povrchu, nebo k povrchu kontaktní podložky, pomocí tenké izolační vrstvy epoxidového lepidla (Obrázek 1-5).



Obr. 1-5 – drátěná mřížka

Jestliže je kontaktní podložka napnuta, přeneseme lepidlo poměrné prodloužení na materiál mřížky. Poměrné prodloužení se určuje měřením změny elektrického odporu mřížky. Tvar mřížky je navržený tak, aby tenzometr měl, při co nejmenší délce a šířce tenzometru, co největší odpor.

Spojné polovodičové tenzometry si drží v aplikacích své dobré postavení. Jsou relativně levné, lze s nimi dosáhnout celkové přesnosti lepší než $\pm 0.10\%$, tenzometry jsou k dispozici v malých délkových rozměrech, jejich vlastnosti jsou jen mírně ovlivňovány teplotními změnami, mají malé fyzikální rozměry a malou hmotnost, a mají velkou citlivost. Spojné polovodičové tenzometry lze použít pro měření jak statického, tak dynamicky se měnícího poměrného prodloužení.

Při připevňování tenzometrů na napínaný povrch je třeba vzít v úvahu, že je tenzometr napínán stejně, jako je napínáno měřené těleso. Díky materiálu lepidla, které se vkládá mezi snímač a napínaný povrch, je instalace citlivá na creep, tečení lepidla, projevujícího se při zhoršování stavu spoje, na teplotní vlivy a na hysterezi způsobenou

termomechanickým namáháním. Protože jsou mnohá lepidla a epoxidové pryskyřice ke creepu náchylné, je důležité vybrat takové pryskyřice, které jsou pro lepení tenzometrů speciálně určené.

Spojný odporový tenzometr je vhodný pro práci v široké škále prostředí. Může se s ním měřit jak poměrné prodloužení na turbínách tryskových motorů pracujících za velmi vysokých teplot, tak poměrné prodloužení v aplikacích pracujících s kryogenními kapalinami, kde jsou nízké teploty až $-452\text{ }^{\circ}\text{F}$ ($-269\text{ }^{\circ}\text{C}$). Má malou hmotnost a malé rozměry, vysokou citlivost, a je vhodný jak pro statické, tak pro dynamické aplikace. Fóliové tenzometry jsou k dispozici s odpory měřky od 0,2 mm do 100 mm. Komerčně dostupné tenzometry mají délky od 0.008 palce do 4 palců. Při výběru tenzometru se uplatňují následující tři základní požadavky a hlediska: teplota, ve které bude tenzometr pracovat, druh poměrného prodloužení, které se bude tenzometrem měřit a požadavky na stabilitu. Pro zajištění úspěchu aplikace je dále třeba vybrat správný materiál podložky, slitinu mřížky, lepidlo, a ochranný obal tenzometru.

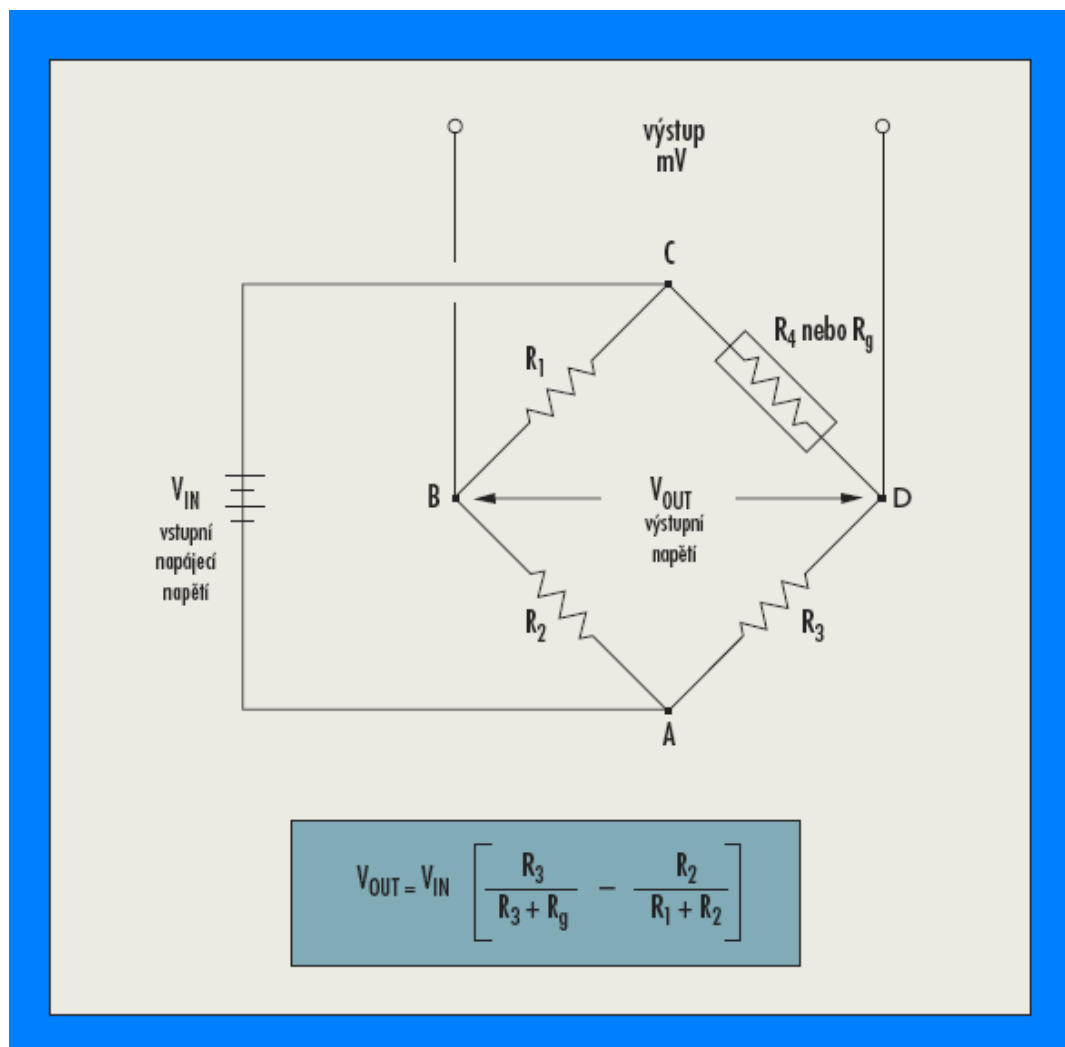
2.2. Měřící obvody:

Aby bylo možno spojnými odporovými tenzometry měřit poměrné prodloužení, musí být tenzometry připojeny na elektrický obvod, který je schopný měřit okamžité změny odporu, odpovídající změnám měřeného poměrného prodloužení. Převodníky tenzometrů jsou obvykle tvořeny atyřmi prvky, elektricky zapojenými tak, aby vytvářely Wheatstoneův můstek (Obrázek 1-6).

Wheatstoneův můstek je poměrový můstkový elektrický obvod, který se používá pro měření jak konstantního, tak dynamicky se měnícího elektrického odporu. Výstupní signál Wheatstoneova můstku se vyjadřuje v milivoltech výstupního poměrného prodloužení na volty vstupního poměrného prodloužení. Obvodové zapojení Wheatstoneova můstku je také vhodné pro realizaci teplotní kompenzace.

Z obrázku 6 je zřejmé, že pokud jsou hodnoty odporů R_1 , R_2 , R_3 a R_4 stejné, pak po přivedení napětí mezi body A a C není mezi body B a D žádný napěťový rozdíl. Změní-li se však hodnota odporu R_4 na hodnotu, která není rovna hodnotám odporů R_1 , R_2 a R_3 , můstek se rozváží a na výstupních svorkách můstku se objeví elektrické napětí. V této tzv. čtvrtinové konfiguraci můstku má odpor, který je citlivý na poměrné prodloužení, hodnotu R_g , odpory v ostatních větvích můstku mají stále stejnou

konstantní hodnotu.



Obr. 1-6 - Wheatstoneův můstek

Tenzometr, snímač, může ale obsadit jednu, dvě, nebo čtyři větve můstku. Celkové poměrné prodloužení, nebo výstupní napětí můstku (V_{out} je dáno rozdílem poklesu napětí na odporech R_1 a R_4 , resp. R_g). Tuto skutečnost lze zapsat jako: $V_{OUT} = V_{CD} - V_{CB}$. Detailní vysvětlení podává obrázek 1-6. Můstek je vyvážený, pokud platí $R_1/R_2 = R_g/R_3$, u vyváženého můstku je V_{out} rovno nule.

Libovolná malá změna odporu tenzometru přivede můstek do rozváženého stavu, můstek detekuje poměrné prodloužení. Je-li můstek nastavený tak, že je aktivní tenzometr umístěný pouze jako odpor R_g , vede ke generování výstupního napětí můstku malá změna odporu R_g . Je-li faktor měrky GF, závisí hodnota poměrného prodloužení

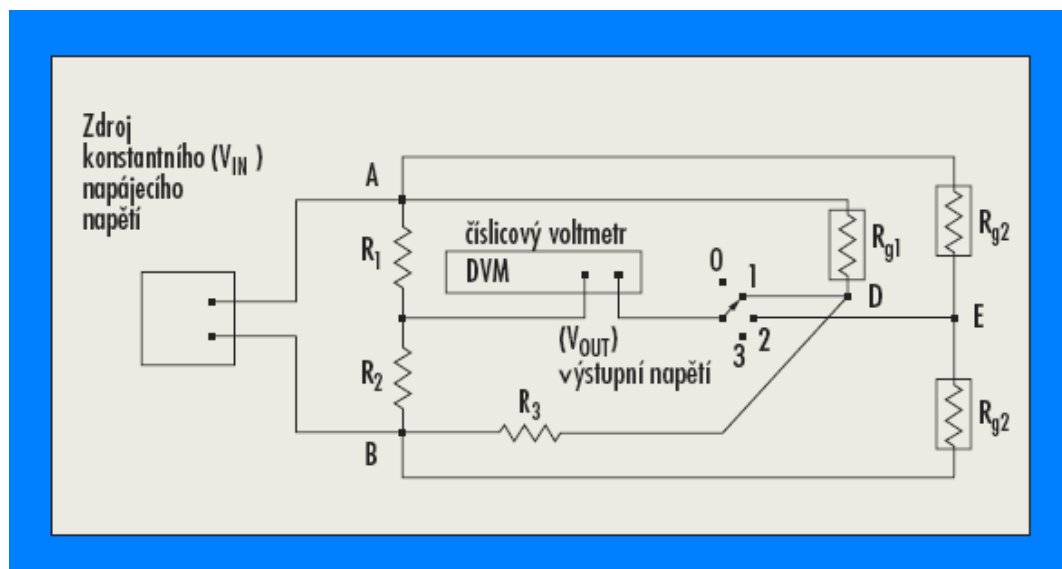
měřeného můstkem na hodnotách R_g a DR_g vztahem „poměrné prodloužení = $(\Delta R_g/R_g)/GF$ “. Počet aktivních tenzometrů, které mohou být v můstku zapojeny závisí na konkrétní aplikaci. Může být například užitečné připojovat do můstku dva tenzometry umístěné na opačných stranách nosníku tak, že jeden z tenzometrů je namáhaný stlačením a druhý natažením. Při takovémto uspořádání lze při stejném poměrném prodloužení účinně dvakrát zvětšit velikost výstupního signálu. V instalacích kde jsou všechny větve můstku tvořeny stejnými tenzometry dochází k automatické kompenzaci vlivu teploty, změny odporu ke kterým dochází v důsledku změny teploty jsou ve všech větvích můstku stejné.

U můstku se čtyřmi aktivními tenzometry se obvykle dvě větve zapojují pro měření stlačení a dvě pro měření natažení. Jsou-li například odpory R_1 a R_3 v měrkách natahovány (kladná změna odporu) a odpory R_2 a R_4 v měrkách stlačovány (záporná změna odporu), je výstup úměrný součtu všech čtyř poměrných prodloužení, čtyřikrát větší oproti stavu, kdy by se každé poměrné prodloužení měřilo zvlášť. U tenzometrů zapojených v přilehlých větvích se můstek rozvažuje úměrně rozdílu poměrných prodloužení. U tenzometrů zapojených v protilehlých větvích se můstek rozvažuje úměrně součtu poměrných prodloužení. Jak při měření ohybového, tak při měření axiálního, posuvného, poměrného prodloužení, Poissonova poměrného prodloužení, zkосу ve smyku, nebo zkосу ve smyku při torzi, určuje vztah mezi výstupním signálem a typem měřeného poměrného prodloužení uspořádání tenzometru. Z obrázku 6 je zřejmé, že objeví-li se na tenzometrech R_2 a R_3 kladné poměrné prodloužení vzniklé tahem a na tenzometrech R_1 a R_4 záporné poměrné prodloužení vzniklé tlakem, výstupní napětí můstku V_{out} se nezmění.

2.2.2. Chevronův můstek:

Chevronův můstek je uvedený na obrázku 1-7. Chevronův můstek je vícekanálové zapojení, kterým se kompenzují změny v hodnotách odporů větve jejich periodickým připínáním. V ukázaném zapojení je použit jednopólový čtyřkanálový přepínač, pomocí kterého se číslicový voltmetr (DVM) připojuje postupně k zapojení, realizujícímu čtvrtinový (jeden tenzometr v jedné aktivní větvi) a poloviční (dva tenzometry ve dvou aktivních větvích) můstek. Na číslicový voltmetr je stále připojena druhá, vnitřní, polovina můstku a referenční hodnota napájecího napětí. Toto zapojení je nejžádanější

při měření poměrného prodloužení u strojů s rotujícími částmi, kde vede ke snížení počtu potřebných kontaktních kroužků.



Obr. 1-7 - Chevronův můstek

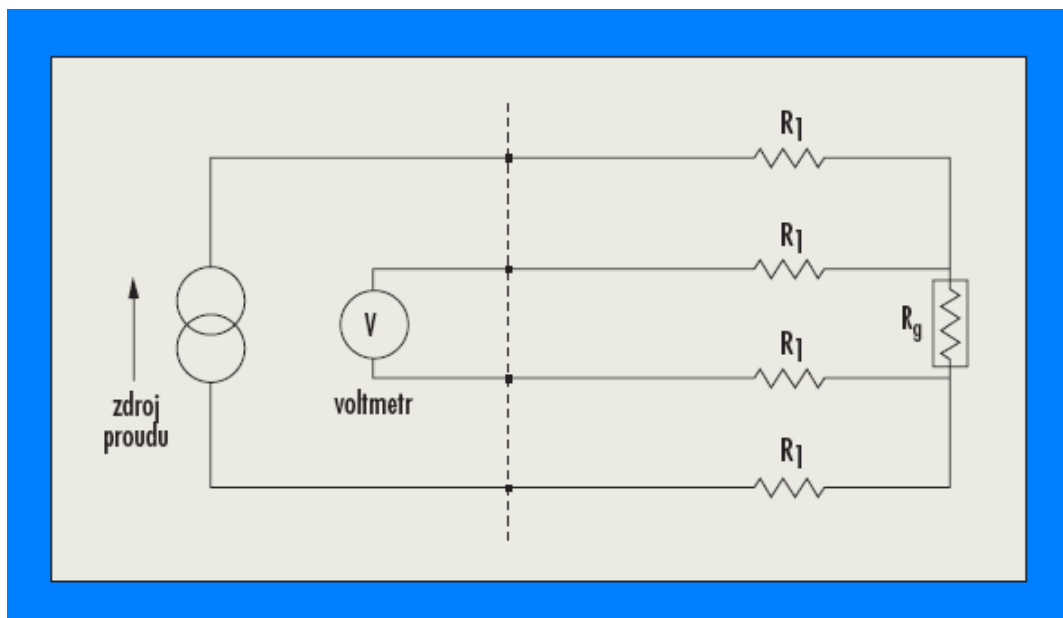
2.2.3. Ohmův obvod ve čtyřdrátovém zapojení:

I když je Wheatstoneův můstek jedním z nejoblíbenějších prostředků pro měření elektrického odporu, jsou k dispozici i jiné metody. Hlavní výhodou čtyřdrátového zapojení Ohmova obvodu je, že se měřené napětí určuje přímo na tenzometrické měrce, takže měřená hodnota poměrného prodloužení není ovlivněna odporem napájecích vodičů a vodičů signálního vedení.

Ohmův obvod ve čtyřdrátovém zapojení může sestávat z voltmetru, zdroje proudu a ze čtyř odporů vedení, označme je R_1 , zapojených v sérii s odporem tenzometru R_g (Obrázek 1-8). Signál je na číslicový voltmetr přivedený přes vysokoohmový vstup voltmetru, proudový zdroj číslicového voltmetru je využitý pro napájení měřicího obvodu. Pro měření poměrného prodloužení se obvod napájí malým proudem, obvykle proudem 1 mA. Voltmetr měří napěťový spád na odporu R_g , hodnotu R_g určuje číslicový voltmetr (multimetr) z hodnoty měřeného napětí a hodnoty proudu.

Měření se obvykle provádí tak, že se změří hodnota odporu tenzometru ve stavu, kdy tenzometr není namáhaný poměrným prodloužením, teprve poté se provede druhé měření ve stavu, kdy je na tenzometr přivedeno poměrné prodloužení. Rozdíl mezi

změřenými odpory tenzometru dělený odporem tenzometru ve stavu, kdy není namáhaný poměrným prodloužením je hodnota, která spolu s faktorem měrky (GF) slouží k výpočtu poměrného prodloužení.



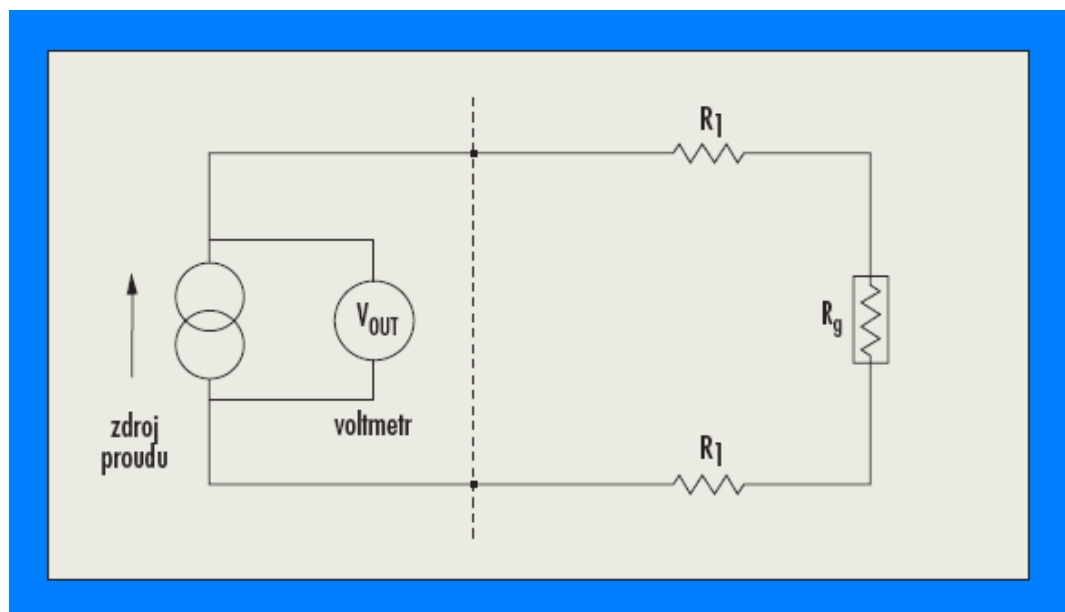
Obr. 1-8 – Ohmův obvod

Ohmův obvod ve čtyřdrátovém zapojení je také vhodný pro automatickou korekci elektrického napětíového offsetu přístroje. Nejdříve se změří napětí ve stavu, kdy obvodem neprotéká elektrický proud. Tato hodnota se potom odečte od hodnoty napětí, změřené ve stavu, kdy je na obvod přivedený elektrický proud. Výsledná hodnota se použije pro výpočet odporu tenzometru. Vzhledem ke své citlivosti je čtyřdrátové zapojení tenzometrů vhodné pro měření dynamických poměrných prodloužení o malých frekvencích. Při měření poměrného prodloužení o vyšších frekvencích je nutné výstupní signál obvodu zesílit. Stejný obvod může být také použitý s polovodičovými tenzometry a s rychlým číslicovým voltmetrem. Je-li citlivost číslicového voltmetru 100 mikroVoltů a je-li napájecí proud obvodu 0,44 miliAmpéru, odpor tenzometru 350 ohmů a faktor měrky je roven 100, získáme rozlišovací schopnost měření 6 mikrostrainů.

2.2.4. Obvody pracující s konstantním proudem:

Odpor lze měřit tak, že můstek napájíme buď ze zdroje konstantního napětí, nebo ze zdroje konstantního proudu. Protože $R = U/I$, tak je-li U konstantní, mění se I v závislosti na odporu a naopak. Lze použít obě metody.

I když použití zdroje konstantního proudu nepřináší oproti použití zdroje konstantního napětí teoreticky žádnou výhodu (Obrázek 1-9), bude v některých případech v systémech pracujících s konstantním proudem charakteristika můstku lineárnější. Při použití zdrojů konstantního proudu také není nutné měřit na můstku napětí, což umožňuje zapojit tenzometr do obvodu pouze dvěma vodiči.



Obr. 1-9 - Obvody pracující s konstantním proudem

Obvod pracující s konstantním proudem je nejvíce efektivní v případě, že se měří dynamické namáhání. Je tomu tak proto, že způsobuje-li změnu odporu tenzometru (R_g) dynamicky se měnící síla, měří se obvykle pouze časově proměnná složka výstupního signálu (V_{out}), zatímco pomalu se měnící jevy, jako změna odporu vodičů v důsledku teplotních změn, se považují za nepodstatné. Při použití takovéto konfigurace měřicího obvodu je teplotní drift prakticky zanedbatelný.

2.3. Aplikace a instalace:

Výstupem obvodu s tenzometrem je napěťový signál o velmi malé úrovni, vyžadující citlivost měřicího přístroje 100 mikroVoltů, nebo lepší. Malá velikost signálu způsobuje, že je signál v praxi náchylný na rušení nežádoucím šumem, generovaným jinými elektrickými zařízeními. V úvahu připadají především zdroje rušení dané kapacitní vazbou vodičů signálního vedení obvodu se silovými kabely střídavého (sítového) rozvodu, pokud jsou vedeny paralelně se signálním vedením a zdroje rušení dané zemními proudy. Jinými zdroji chyb mohou být napětí generovaná elektromagnetickou indukcí, pokud vodiče signálního vedení procházejí proměnnými magnetickými poli, porucha izolace, nebo napětí vzniklá na spojích různých kovů v důsledku termoejektu. Součet těchto rušení může mít za následek významné znehodnocení signálu.

2.3.1. Stínění:

Většinu problémů s elektrickým rušením a problémů se šumem lze vyřešit správným stíněním a zemněním. Stínění provedené kolem vodičů signálního vedení zachytí a potlačí rušení a může také snížit chyby dané zhoršením izolace. Stínění také chrání měření před působením kapacitních vazeb. Vede-li se signální vedení v blízkosti zdrojů elektromagnetického rušení, například v blízkost transformátorů, minimalizuje se zhoršení signálu elektromagnetickou indukcí použitím krouceného vedení. Zkroucením vodičů signálního vedení se dosáhne toho, že se napětí generovaná elektromagnetickou indukcí do jednotlivých ok krouceného vedení vzájemně kompenzují. V průmyslových aplikacích se používají stíněná a kroucená signální vedení téměř bezvýhradně.

2.3.2. Stínění a ochrana přístrojů:

Správné stínění a ochrana samotných přístrojů jsou stejně důležité jako správné stínění signálního vedení. Stínění a ochrana přístrojů se realizuje kovovou plechovou krabicí, která uzavírá analogové obvody přístrojů a která je spojena se stíněním signálního vedení. Pokud protékají tenzometrem nebo jeho vodiči zemní proudy,

nerozezná je Wheatstoneův můstek od proudů, generovaného proudovým zdrojem. Stínění a ochrana zajišťuje, že se svorky všech elektrických přístrojů nacházejí na stejném potenciálu, což zabraňuje, aby obvody tekly nepatřičné vnější proudy.

Spojí-li se testovaný objekt a záporná svorka napájecího zdroje ochranným vodičem, vytvoří se v měřicím obvodu další proudová vazba. Vytvořením této cesty se přehradí cesta, kterou teče proud způsobující chybu měření. Všechny prvky měřicího obvodu, které toto řešení zahrnuje (tj. plovoucí napájecí zdroje, tenzometr, veškeré další přístrojové vybavení použité pro měření), jsou na stejném potenciálu jako měřený objekt. Chyba daná souhlasným napětím může být účinně potlačena použitím stíněných signálních vodičů a integračních číslicových voltmetrů opatřených stíněním a ochranou.

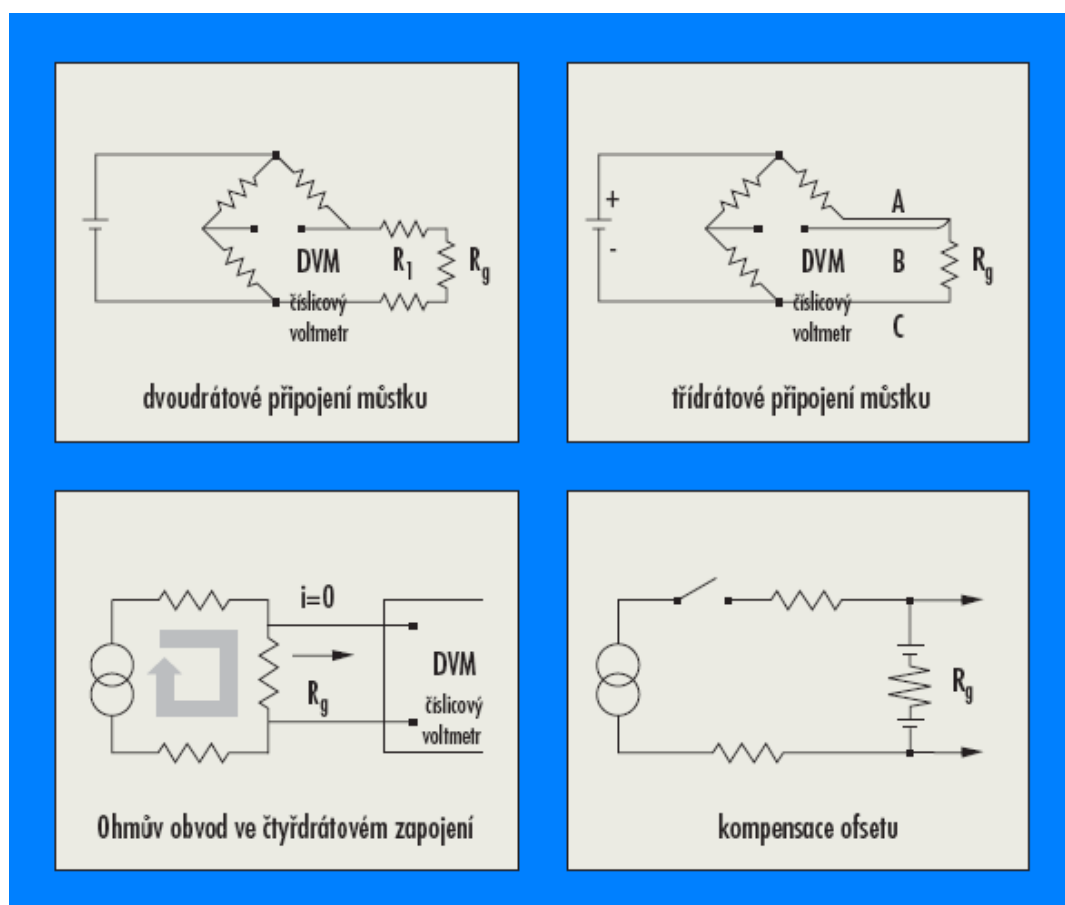
2.3.3. Účinky signálního vedení:

Tenzometry se někdy instalují ve větší vzdálenosti od ostatního měřicího zařízení. Tím se zvyšuje možnost chyby v důsledku teplotních změn, snížení citlivosti signálního vedení a změn odporu vodičů signálního vedení. U dvoudrátové instalace snímače (Obrázek 1-10A) jsou dva vodiče signálního vedení zapojeny v sérii s aktivním odporem tenzometru. To má za následek, že je každá změna v odporu vodičů (R_1) nerozeznatelná od změny aktivního odporu (R_g) tenzometru.

Ke korekci vlivu vodičů signálního vedení lze přispět připojením třetího vodiče do horního uzlu aktivního odporu můstku, viz (Obrázek 1-10B). Při této konfiguraci slouží vodič C pouze pro odečtení hodnoty měřeného signálu, vodičem C neteče žádný napájecí elektrický proud, vodiče A a B jsou v protilehlých větvích můstku. Tuto metodu lze považovat za minimální přípustné řešení připojení tenzometru k můstku, zapojení alespoň částečně potlačuje chybu vzniklou na delším signálním vedení. Teoreticky platí, že pokud vodiče, které vedou v signálním vedení ke snímači, mají stejný jmenovitý odpor, stejný teplotní koeficient odporu a pokud jsou udržovány na stejné teplotě, dosáhne se třídrátovým zapojením úplné kompenzace vlivu vedení. Ve skutečnosti jsou vodiče vyráběny s tolerancí asi 10 % a třídrátovým zapojením se chyby dané vodiči dvoudrátového zapojení úplně nepotlačí, jejich velikost se však zmenší o řád. Je-li potřeba další zlepšení, lze uvažovat o čtyřdrátovém zapojení a o zapojení, pomocí kterého se kompenzuje offset (Obrázky 1-10C a 1-10D).

U dvoudrátových zapojení je chyba způsobená odporem signálních vodičů funkcí

poměru R_1/R_g odporů. Chyba způsobená odporem signálních vodičů je obvykle nevýznamná v případech, kdy je odpor R_1 vodiče oproti odporu tenzometru R_g malý, přesahuje-li ale odpor vodiče 0.1 % jmenovité hodnoty odporu tenzometru, začíná být vedení významným zdrojem chyb. V průmyslových aplikacích je proto třeba signální vedení buď úplně potlačit, nebo délky signálního vedení minimalizovat, umístěním vysílače přímo ke snímači.



Obr. 1-10 – Druhy obvodů

2.3.4. Teplota a faktor měrky:

Materiály, které jsou citlivé na poměrné prodloužení, jako například měď, mění při vysokých teplotách svoji vnitřní strukturu. Teplota může změnit nejen vlastnosti tenzometru, ale může změnit i vlastnosti základního materiálu, ke kterému je tenzometr

přípevněný. Rozdíly mezi teplotní roztažností materiálu tenzometru a teplotní roztažností základního materiálu mohou způsobit, že u měřícího prvku tenzometru dojde ke změnám rozměrů.

Protažení nebo stlačení měřícího prvku tenzometru a nebo základního materiálu způsobuje chybu, která se obtížně koriguje. Příkladem je změna odporu tenzometru nebo změna jeho teplotního koeficientu odporu, které způsobují změnu referenční nuly při kalibraci zařízení.

Faktor měřky je rovný citlivosti tenzometru na poměrné prodloužení. Výrobce tenzometru by měl vždy poskytovat také údaje o teplotní citlivosti, závislosti, faktoru měřky. Slitiny mědi a niklu, například slitina advance, mají faktory měřky, jejichž hodnota se se změnou pracovní teploty mění relativně málo. Tyto materiály jsou proto pro konstrukci tenzometrů používány nejvíce.

2.3.5. Zdánlivé poměrné prodloužení:

Zdánlivé poměrné prodloužení je každá změna odporu měřícího prvku tenzometru, která není způsobena silou působící na tento měřící prvek. Zdánlivé poměrné prodloužení je výsledkem vzájemného působení, interakce, teplotního koeficientu tenzometru rozdílu mezi roztažností materiálu tenzometru a roztažností materiálu měřeného objektu. Zdánlivé poměrné prodloužení se může, kromě změn způsobených těmito teplotními vlivy, měnit i v důsledku stárnutí a nestability kovu a lepidla, nebo jiného materiálu, kterým je tenzometr upevněný.

Kompenzace zdánlivého poměrného prodloužení je nutná tehdy, mění-li se v průběhu měření poměrného prodloužení teplota. Ve většině aplikací závisí velikost chyby na použité slitině a na velikosti teplotních změn. Volba materiálu tenzometru mnohdy závisí i na přesnosti, se kterou výsledek měření požadujeme. Je-li pracovní teplota tenzometru známá a je-li známá závislost zdánlivého poměrného prodloužení na teplotě, je kompenzace možná.

2.3.6. Přístup k řešení stability:

Je žádoucí, aby byl systém pracující s tenzometry stabilní, a aby nevykazoval drift (kolísání nuly signálu v čase). U přístrojů dochází po jejich kalibraci v průběhu času k nárůstu driftu a k postupné ztrátě kalibrace. Stabilita spojných (mechanicky manuálně

přípevňovaných) tenzometrů je horší, než stabilita difúzně nanášených tenzometrů. Jedněmi z hlavních příčin nestability, zejména při práci v prostředí o vyšších pracovních teplotách, jsou hystereze a creep způsobené chybným přípevněním tenzometru.

Protože jakékoliv deformace povrchu elementu, převádějícího sílu na mechanické napětí, vedou k chybě v důsledku nestability, je třeba před montáží tenzometru zajistit, aby byl element normalizovaný a homogenní. Pro odstranění zbytkových, reziduálních, napětí v elementech je třeba elementy převádějící sílu na mechanické napětí opatrně žíhat, ustálit, a uvolnit jejich mechanická napětí temperováním. Převodníky, které používají pro detekci síly pára, membrány a měchy je také třeba opatřit mechanickou ochranou, mechanickou izolací. Mechanická izolace chrání převodník před vnějšími mechanickými napětími, vyvolanými deformací při montáži nebo při přípevňování elektrických vodičů k převodníku.

Používají-li se stabilní tenzometry, například nanášené tenkovrstvé tenzometry typu thin-film, a je-li dobře navržena konstrukce převádějící sílu na mechanické napětí, jsou pro periodické obnovování kalibrace přístroje postačující vyvažovací a kompenzační odpory. Nejstabilnější snímače a měrky jsou konstruovány z platiny a z jiných materiálů, které mají malé teplotní koeficienty. Je také důležité, aby převodník pracoval v mezích, pro které byl zkonstruován. V opačném případě může docházet k trvalému ujíždění kalibrace. Vystavení převodníku teplotám, které jsou mimo jeho pracovní meze, může také vést ke znehodnocení jeho chování a provedení. Převodník je ze stejného důvodu třeba chránit před vibracemi, před zrychlením a před rázem.

2.3.7. Konstrukce převodníků:

Tenzometry se používají pro měření odchylky, síly, zatížení, tlaku, kroutícího (točivého) momentu, váhy. Moderní převodníky pracující s tenzometry obvykle používají pro měření sestavu tvořenou čtyřmi tenzometrickými prvky, zapojenými do Wheatstoneova můstku.

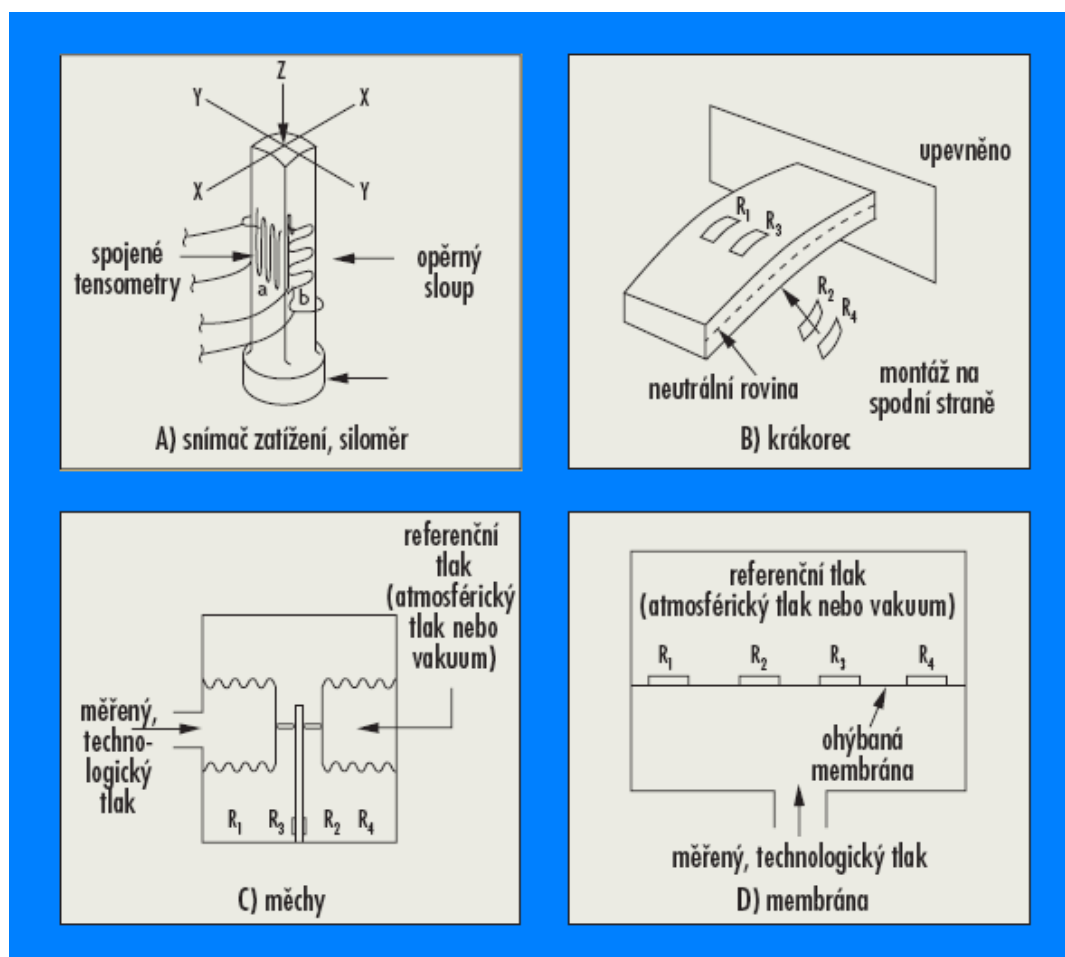
Tenzometry jsou jedním z nejpoužívanějších prostředků pro měření zatížení, síly a váhy. Obrázek 1-11A ukazuje vertikálně umístěný opěrný sloup, nosník, který je namáhaný silou, působící ve směru jeho vertikální osy. Po přivedení síly se opěrný sloup elasticky, pružně deformuje. Deformace má za následek změnu odporu každého z

tenzometrů. Velikost zatížení lze měřit Wheatstonovým můstkem. Tenzometry pro měření zatížení jsou obecně rozšířené vážicí prvky pro měření při vážení nádob a nádrží, které jsou používány v silech. Jejich přesnost při vážení je ověřena mnoha dalšími aplikacemi.

Pro měření síly při ohybu lze tenzometry připevnit na převislé pružnice, krákorci (Obrázek 1-11B). Tenzometr připevněný na horní stranu nosníku je namáháný na tah, tenzometr, který je připevněný na spodní stranu nosníku je namáháný na tlak. Obvod převodníku tvoří zapojení realizující Wheatstoneův můstek, převodník slouží pro měření velikosti síly, působící na krákorec.

Tenzometry se také široce používají v konstrukcích průmyslových snímačů tlaku. Obrázek 1-11C ukazuje měchový snímač tlaku, u kterého je referenční tlak přivedený těsněným vstupem dovnitř pravého měchu, do protilehlého měchu je přivedený měřený tlak. Je-li mezi oběma tlaky tlakový rozdíl, měří tenzometry připevněné na nosník, na krákorec, výslednou tlakovou nebo tahovou sílu.

Membránové převodníky tlaku jsou tvořeny čtyřmi tenzometry, připevněnými na membránu převodníku (Obrázek 1-11 D). Je-li na převodník přivedený měřený tlak, jsou dva střední tenzometry namáhány na tah, dva krajní tenzometry jsou namáhány na tlak. Mírou přivedeného měřeného tlaku jsou odpovídající změny jejich odporu. Pokud mají všechny tenzometry stejnou teplotu, uvedené řešení převodníku je příkladem takového uspořádání, pak se chyby způsobené změnami pracovní teploty vzájemně potlačují.



Obr. 1-11 – konstrukce převodníků

2.3.8. Diagnostika instalací:

Všechny instalace, montáže, tenzometrů je třeba testovat a kontrolovat. Při kalibraci se postupuje podle následujících kroků:

1. Změří se základní odpor nenapjatého tenzometru po jeho připevnění, měření se provede před připojením signálního vedení.

2. Měřené povrchy se zkontrolují na znečištění, resp. poškození. V případě, že je napínaný element, na který je tenzometr připevněný, elektricky vodivý, provede se kontrola povrchu měřením. Změří se elektrický izolační odpor mezi mřížkou tenzometru a napínaným elementem. Pro měření se použije ohmmetr. Měření je třeba provést před připevněním signálního vedení k přístrojům. Je-li izolační odpor menší než 500 megaohmů, je pravděpodobné, že jsou povrchy znečištěny, resp. poškozeny. Zkontroluje se, zda se do obvodu neindukuje z vnějších zdrojů elektrické napětí. Měření se provede měřením výstupního napětí tenzometru ve stavu, kdy není tenzometr napojený na zdroj napájecího napětí. Elektrická napětí, naměřená na můstku, musí být ve všech kanálech tenzometrů blízka nule.
3. Na můstek se připojí zdroj napájecí energie. Zkontroluje se, že elektrický proud a elektrické napětí mají správné hodnoty. Zkontroluje se stabilita těchto veličin.
4. Zkontroluje se připevnění tenzometru. Tenzometrem se opakovaně změří stejné poměrné prodloužení, u správně připevněného tenzometru se nesmí výsledky lišit.

3. Návrh koncepčního řešení:

Pro měření svěrných sil mezi brzdovými destičkami se používá metoda, při které dochází k nestejněměrnému rozložení sil na tenzometru, a tím pádem vykazuje tenzometr značné zkreslení. A proto jsme se rozhodli vylepšit současnou metodu měření používanou firmou TRW v Jablonci a to sice tak, že místo jednoho snímače (tenzometru), použijeme čtyři tenzometry. To proto, aby byla zjištěna co nejlépe přesnost používané metody. Tenzometry totiž neměří jen sílu na ně působící ve svislé ose, ale reagují i na sílu působící šikmo na osu, což přináší do metody měření značné nepřesnosti. U měření svěrných sil mezi brzdovými destičkami dochází při vysokém zatížení k průhybu třmenu brzdy, a tím k nestejněměrnému zatížení tenzometru, a tím pádem ke zkreslení metody měření. Proto jsme se rozhodli k měření využít více senzorů rozmístěných na brzdové destičce k zjištění nerovnoměrného rozložení sil.

Působí-li zatížení ve směru osy válcového siloměru OMEGADYNE LCMKD – 5KN, vyvolává jeho stlačení, což vyvolá při vstupním napájecím napětí 5Vdc na jeho výstupu napětí úměrné stlačení tenzometru. To znamená, že při stlačení tenzometru silou 5 kilonewtonů bude mít výstupní napětí tenzometru hodnotu 10 voltů. Při stlačení 2,5 kilonewtonů bude 5 voltů a při nulovém stlačení bude napětí také nulové.

Před samotným měřením tenzometry LCMKD – 5KN jsme museli provést jejich kalibraci, kterou jsme provedli pomocí kalibračního listu, který přiložil výrobce k tenzometrům.

Samotná kalibrace proběhla v prostředí LabView a Measurement studio, kde se musel nejdříve nastavit počet senzorů jejich napájecí a výstupní rozsah a převod výstupního napětí na tlak v kilonewtonech. A poté již stačilo jen podle kalibračních listů od výrobce zadefinovat přesné hodnoty.

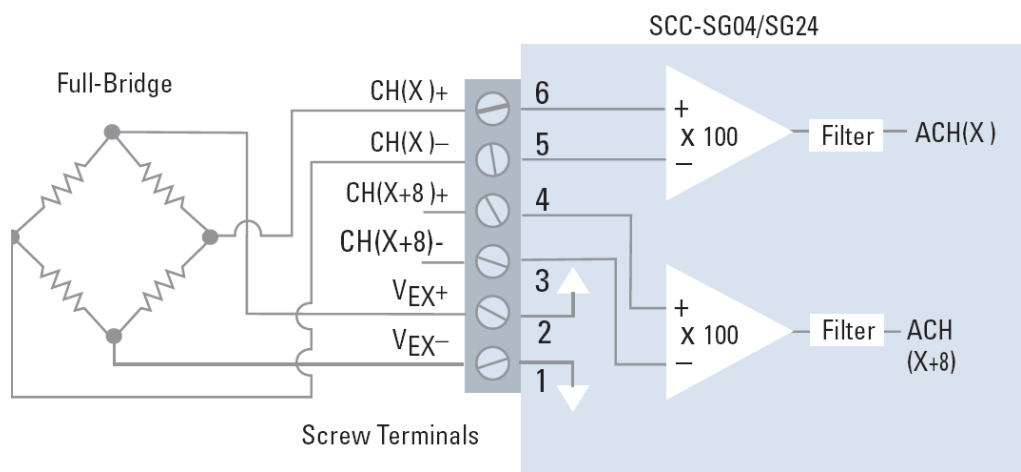
K zesílení a přenesení hodnot z tenzometrů do počítače byly použity SCC moduly od firmy National Instruments SCC-SG04 (k zesílení signálu) a SC-2345 jako sběrnici, do které se zesilovače SCC-SG04 zasouvají a dojde k jejich připojení k celkové sběrnici, která se spojí s PC pomocí karty PCI-6036E a k propojení se použije kabel SH68-68-EP. Karta PCI-6036E přijde k zasunutí do slotu PCI běžného PC, poté již stačí PC a modul SC-2345 propojit příslušným kabelem a je možné naměřené hodnoty zaznamenávat do PC. Existuje i karta, kterou je možno propojit s notebookem pomocí slotu PCMCIA a nebo USB či FireWire a tím docílit mobilnější metody měření.

3.1. Zesilovače SCC-SG04 firmy National Instruments použité při měření:



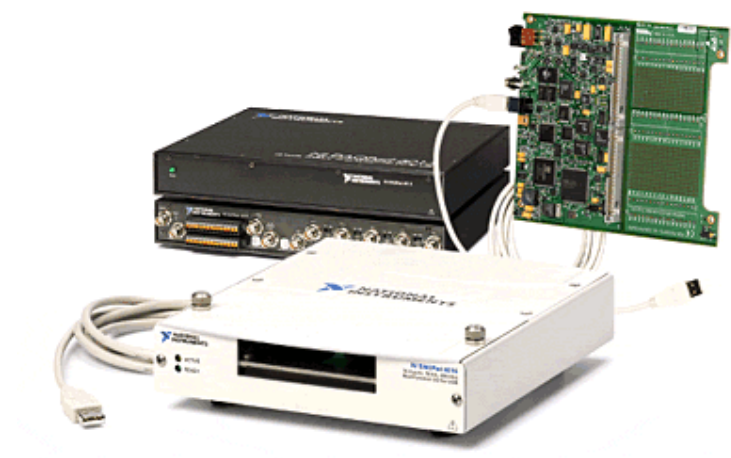
Obr. 2-1 – SCC-SG04

3.2. Blokové schéma zapojení zesilovačů SCC-SG04:



Obr. 2-2 – zapojení

3.3. Modul celkové sběrnice National Instruments SC-2345:



Obr. 2-3 – SC-2345

Potřebujeme-li změřit libovolnou fyzikální veličinu jako např. teplotu, tlak, průtok, proudovou smyčku 4-20 mA atd., pak úpravu signálu na odpovídající úroveň zajistí moduly SC-2345. Moduly jsou mnohakanálové a zahrnují zesílení a izolaci signálu, kompenzaci studeného konce termočlánku, usměrnění, filtraci a mnoho dalších funkcí. Všechny moduly jsou navrženy a testovány pro optimální funkci s dalšími kartami fi National Instruments, což při vývoji měřicího systému ušetří mnoho času a peněz.

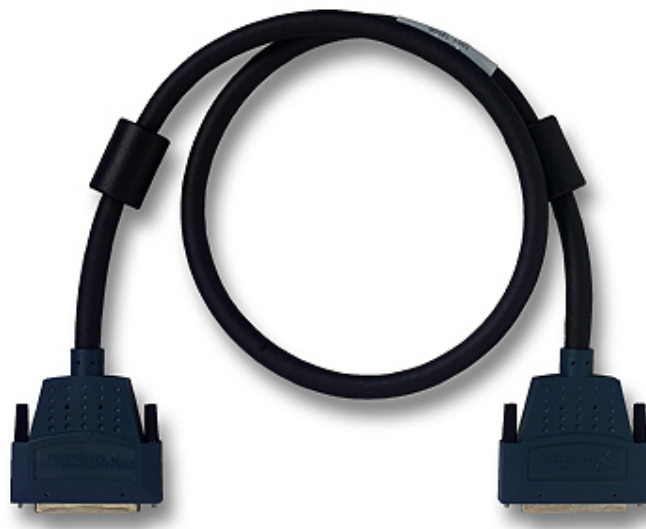
3.4. Karta National Instruments PCI-6036E určená do běžného slotu PCI klasického PC:



Obr. 2-4 - pci karta

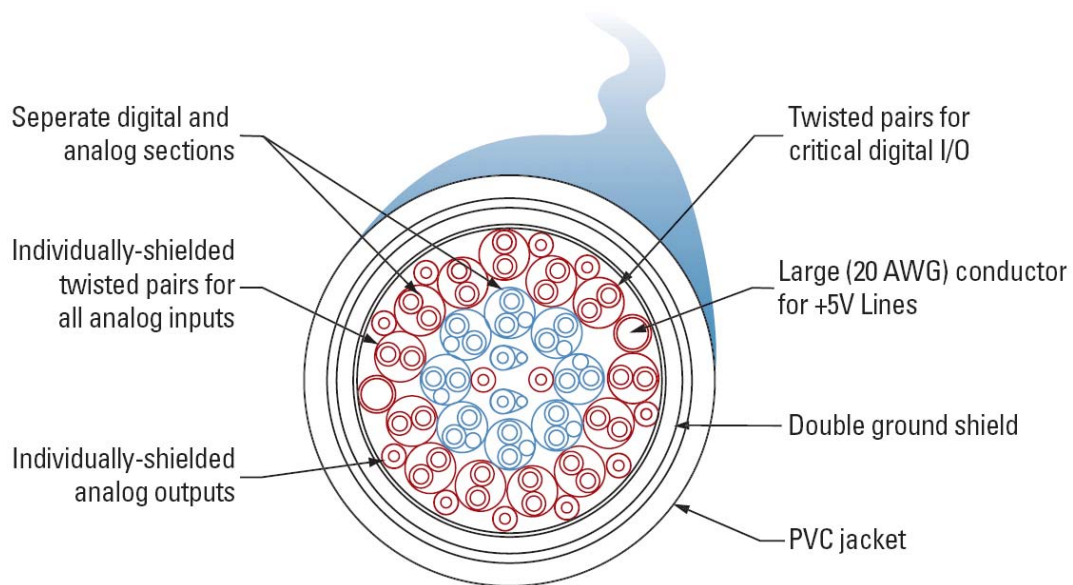
Jedná se o měřicí kartu pro počítačové sběrnice PCI, PC Card (PCMCIA), ISA, EISA, NuBus atd. Na vstupy této karty jsou připojeny analogové nebo digitální signály buď přímo nebo přes moduly pro jejich úpravu. Karta obsahuje A/D převodník s multiplexorem, D/A převodník, digitální vstupy/výstupy a čítače/časovače. Tato multifunkční karta je levnější a univerzálnější než jednoúčelový měřicí přístroj. Karta National Instruments PCI-6036E patří do série E, což jsou levné multifunkční zařízení, které k získávání informací poskytují plnou funkčnost za poměrně nízkou cenu a jsou schopny uspokojit nároky kladené od běžného uživatele. Oproti jejich dražším bratříčkům s mnohem vyšší cenou. Je ideální pro aplikace nepřetržitého vysokorychlostního záznamu dat, při ovládání aplikace vysokonapětovým signálem nebo senzorem měření s NI úpravou signálu.

3.5. Propojovací kabel National Instruments SH68-68-EP:



Obr. 2-5 - kabel

Takto vypadá propojovací kabel SH68-68-EP v řezu:



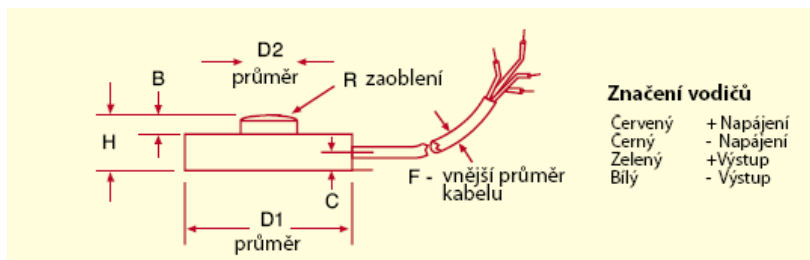
Obr. 2-6 – kabel řez

3.6. Senzory LCMKD – 5KN firmy OMEGADYNE:



Obr. 2-7 - tenzometry

Rozměry tenzometru:



Obr. 2-8 - rozměry

D1 – 19 mm

D2 – 6,1 mm

H – 6,4 mm

B – 0,76 mm

C – 2,5 mm

F – 1,3 mm

Tyto tenzometry byly vybrány z důvodu jejich opravdu bezkonkurenční miniaturní velikosti a možnosti měřit až do váhy 5KN. Subminiaturní čidla série LCMKD jsou konstruována pro požadavky průmyslové automatizace a robotiky. Díky malým

rozměrům (průměr jen 19mm) a nerezovému provedení je lze použít v malých systémech a těžkých provozních podmínkách. Tato série nabízí vysokou přesnost, dlouhodobou spolehlivost a malé rozměry.

SPECIFIKACE tenzometru LCMKD-5KN:

napájení: 5 Vss, max. 7 Vss

výstup: 2 mV/V

přesnost: 0,25% z rozsahu

kalibrace: 0%, 50%, 100%, 50%, 0%

linearita: +/- 0,25% z rozsahu

hystereze: +/- 0,25% z rozsahu

opakovatelnost: +/- 0,10% z rozsahu

kolísání nuly: +/- 2% z rozsahu

provozní teplota: -54 až +107°C

kompenz. teplotní rozsah: 16 až 71°C

vliv teploty

nula: +/- 0,009% rozsahu/°C

rozsah: +/- 0,018% čtené hodnoty/°C

bezpečná přetížitelnost: 150% rozsahu

mezní přetížitelnost: 300% rozsahu

odpor můstku: 350 Ohmů

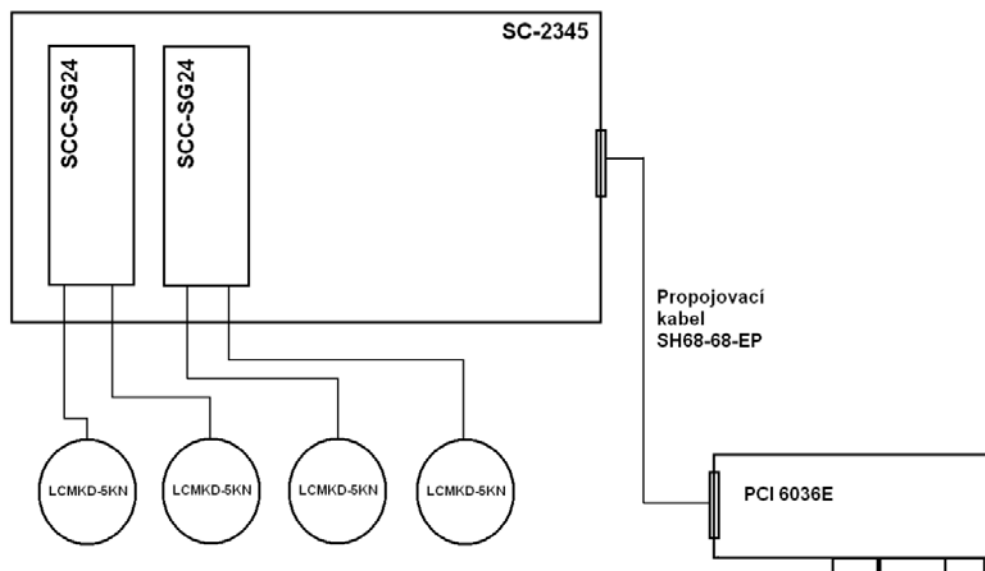
elektrické připojení: 1,5 m PVC kabel

hmotnost: <14g

4. Sestavení kompletu:

4.1. Kompletní schéma zapojení:

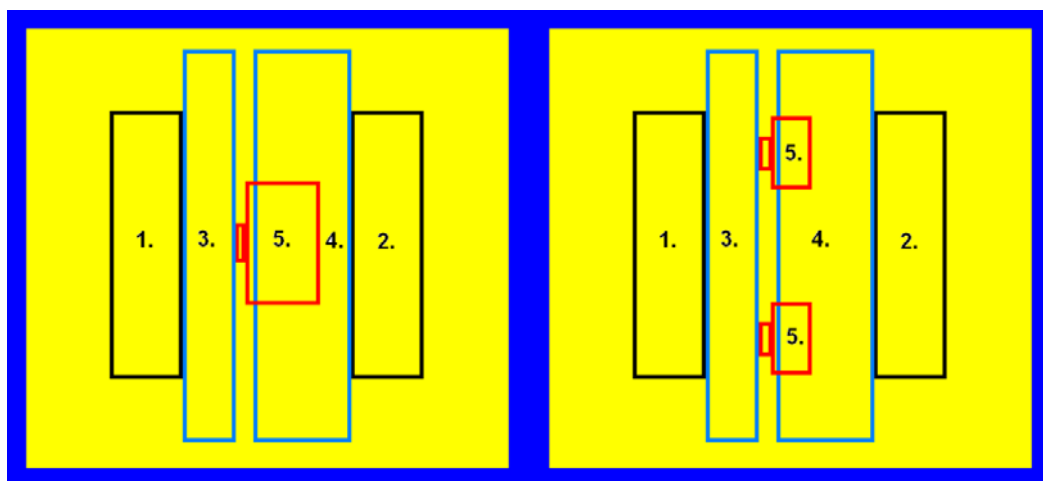
Pro připojení všech čtyř senzorů potřebných pro měření muselo být použito dvou zesilovačů SCC-SG04, protože každý z těchto zesilovačů je schopen měřit pouze ve dvou nezávislých větvích. Tyto moduly se také musely vybírat s ohledem na jejich výstupní napětí, protože tenzometry jsou určeny pro napětí 5V a jejich maximální napájecí napětí je 7V, byly zvoleny moduly SCC-SG04, protože jejich výstupní napětí je 2,5V, což je pro tenzometry přípustné. Další moduly například SCC-SG24 mají již výstupní napětí 10V, což je pro senzory zcela nepřijatelná hodnota. Blokové schéma zapojení celého měřicího kompletu je zobrazeno na (Obrázku 2-9). Tenzometry je možné zapojit přímo na svorkovnici SCC modulů a nebo použít stíněný konektor, který je možno zabudovat přímo do předního panelu SC-2345. Nicméně jakýkoliv sebelepší konektor vnáší do měření jistý nežádoucí odpor, který způsobuje šum a zkresluje tím pádem výsledek měření. Protože tenzometry LCMKD-5KN firmy OMEGADYNE jsou opatřeny velmi kvalitním stíněným čtyřvodičovým kabelem zapojili jsme je přímo na svorkovnice SCC modulů. Dokonce i při přiblížení těchto vodičů k vodičům síťového napětí nedocházelo k žádnému znatelnému rušení při měření.



Obr. 2-9 – Blokové schéma

4.2. Měřicí přípravek:

Po propojení a odzkoušení funkčnosti celé této sestavy, bylo potřeba navrhnout a narýsovat přípravek nahrazující brzdový kotouč ve kterém se budou nacházet všechny čtyři tenzometry. Původně s jedním tenzometrem vypadal měřicí přípravek, jak je znázorněno na (Obrázku 2-10). A po instalaci čtyř tenzometrů jako na (Obrázku 2-11).



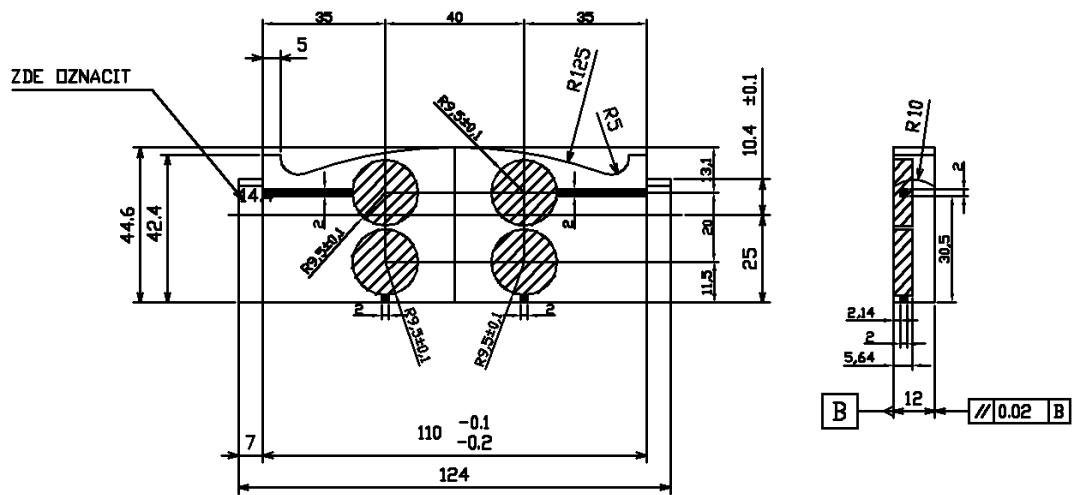
Obr. 2-10 – brzdový komplet

Obr. 2-11 – brzdový komplet (2)

Vysvětlení k obrázkům 2-10 a 2-11:

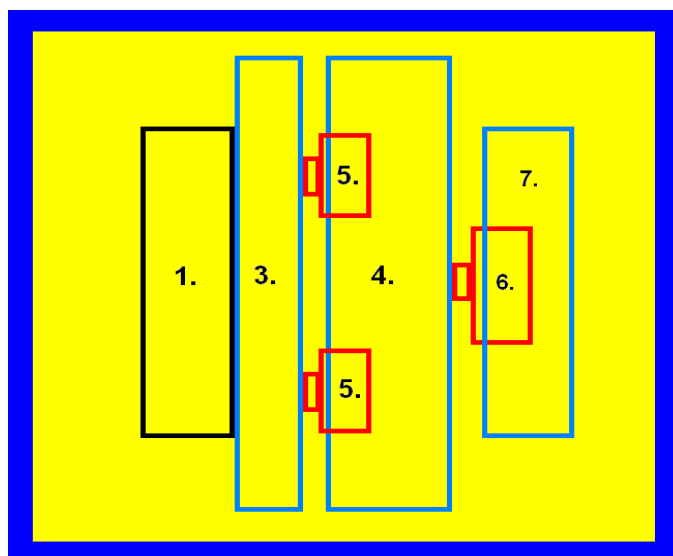
- 1,2 – brzdové destičky
- 3,4 – přípravky nahrazující brzdový kotouč
- 5 – tenzometry

Po důsledném návrhu rozmístění tenzometrů na přípravku byl nakreslen výkres přípravku v AutoCadu a přípravek se poté nechal vyrobít na fréze. Výkres samotného přípravku v AutoCadu vypadá následovně (šrafovaně jsou tenzometry):



Obr. 2-12 - výkres

Pro sestavení měřicího přípravku stačilo již jen vsunout tenzometry do vyfrézovaných otvorů a sestavit celý komplet měřicího brzdového systému. To znamená, že do třmenu brzdy se přidělají brzdové destičky, mezi které se na místo brzdového kotouče připevní jeho náhrada, to je přípravek obsahující tenzometry. Protože bylo potřeba tuto měřicí metodu nejdříve ověřit a zjistit, jestli do měření nevnáší nějaké chyby, nahradili jsme jednu brzdovou destičku kalibračním tenzometrem, se kterým v TRW již řadu let probíhá měření a jeho výstupní výsledky jsou velice přesné. Výsledné zapojení tedy vypadalo jako na (Obrázku 2-13).



Obr. 2-13 – brzdový komplet (3)

Vysvětlení k obrázku 2-13:

- 1 – brzdová destička
- 3,4 – přípravky nahrazující brzdový kotouč
- 5 – tenzometry LCMKD-5KN
- 6 – kalibrační tenzometr
- 7 – přípravek nahrazující brzdovou destičku

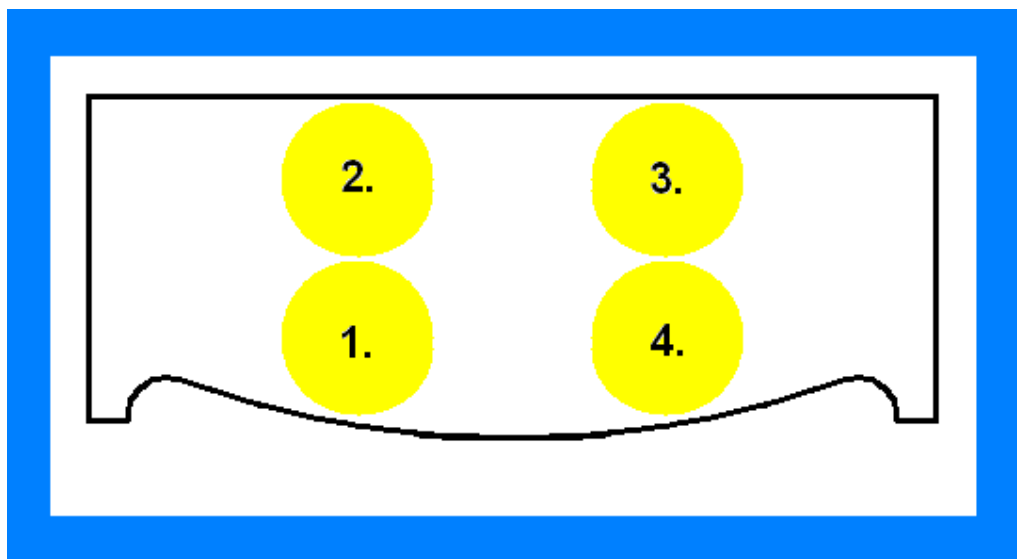
5. Měření:

5.1. Umístění celého brzdového ústrojí na stoličce

Po sestavení a zkompletování měřicího přípravku a celého měřicího systému jsme umístili přípravek na stoličce a napojily na tlakové čerpadlo, které se ovládá přes PC pomocí obslužných programů a je možné na něm nastavit dlouhodobé tlakování. To znamená, že nastavíme, aby tlak nabíhal pozvolna třeba po dobu 20 vteřin od 0 kPa až do tlaku 160kPa, musíme však dát pozor, aby maximální hodnota tlaku nepřetížila senzory, které jsou dimenzovány do maximálního tlaku 5KN. Senzory jsou čtyři, takže maximální hodnota se rozdělí mezi jednotlivé senzory a činí 20KN. Pokud by však docházelo k nerovnoměrnému zatížení senzorů musíme dát pozor, aby nebyla překročena hodnota 5KN na každém ze senzorů. I když výrobce připouští přetížení senzorů až o 150% a mezní přetížitelnost je 300%. To znamená, že nad hodnotou 5KN nedojde k trvalé destrukci tenzometru, ale měření nad touto hodnotou nemá stanovenou přesnost. Tyto výsledky by tudíž asi přinesly do měření značné zkreslení, což je značně nevyhovující.

5.2. Rozmístění tenzometrů

Protože jsme zjistili, že není možné vtěsnat všechny čtyři tenzometry na přípravek, který by nahradil brzdový kotouč, kvůli pevnosti přípravku, který musí být velmi tuhý, aby u něj nedocházelo k jakémukoliv nežádoucímu ohybu. Vytvořili jsme přípravek který nenahrazuje brzdový kotouč, ten zůstává zachován, ale nahradili jsme brzdovou destičku. Brzdová destička má totiž větší tloušťku než brzdový kotouč. Čímž jsme sice nedodrželi původní koncepci, ve které měly být zachovány obě brzdové destičky, ale jiná možnost nebyla. I když jsou tenzometry velice miniaturní, není možné vytvořit stejně miniaturní přípravek pro tenzometry, který by splňoval pevnostní kritéria na něj kladené.

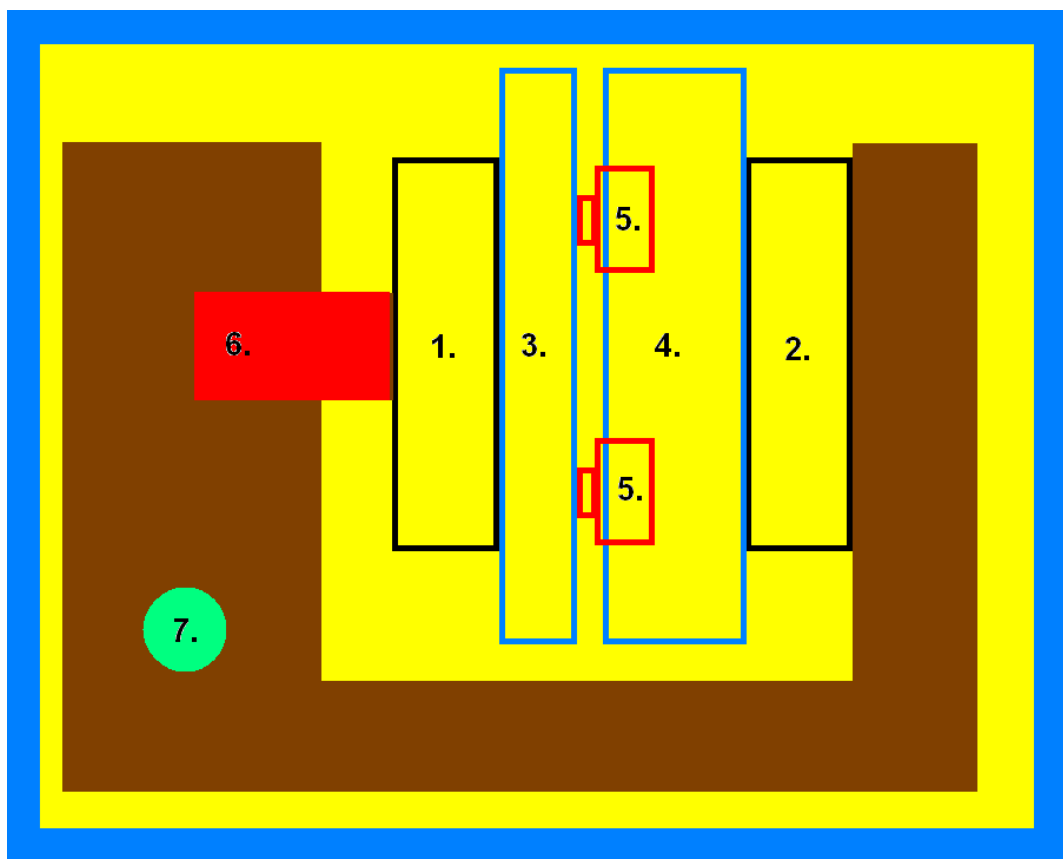


Obr. 3-1 – rozmístění tenzometrů

5.3. Zatížení tenzometrů

Při měření bylo zjištěno, že dochází k nestejnomyšernému zatížení tenzometrů. To jsme, ale očekávali, protože při větším tlaku na brzdu dojde k mírnému ohnutí třmenu, to je znázorněno na obrázku 3-3, což musí být jasně znatelné i na tenzometrech, vše je jasně patrné z přiloženého grafu 1. I při opakovaném měření docházelo k nestejnomyšernému zatížení tenzometrů, čímž se potvrdila naše teorie o ohybu třmenu. Z grafu 1 je jasně patrné, že tenzometry umístěné na spodní straně přípravku, to jsou tenzometry 1 a 4 jsou zatěžovány víc než tenzometry umístěné na horním okraji přípravku (tenzometry 2 a 3). Je to pochopitelné, protože při vyšším tlakovém zatížení pístu dochází k ohybu celého brzdového třmenu a tím pádem k nerovnoměrnému zatěžování tenzometrů. Brzdový třmen se začne takzvaně otevírat, což způsobí větší zatížení na spodním okraji brzdových destiček a tím pádem i větší zatížení spodního okraje našeho přípravku, kde jsou umístěny dva ze senzorů. Rozmístění tenzometrů na přípravku je ilustrováno na obr. 3-1, kde jsou tenzometry označeny žlutou barvou a

obrys přípravku je zde vynesen černou barvou. Orientace přípravku je na obrázku upravena tak, že brzdový třmen se nachází dole, což je jasně patrné z výřezu přípravku pro třmen ve spodní straně.

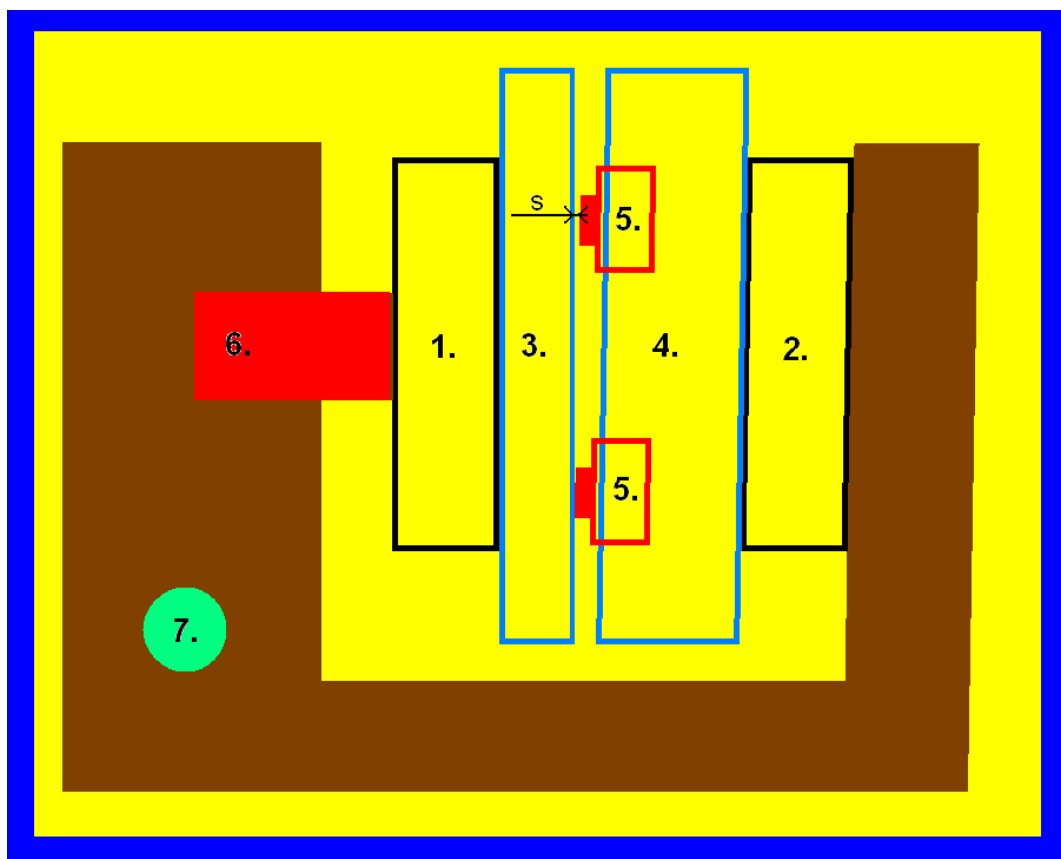


Obr. 3-2 – kompletní sestava se třmenem brzdy

Vysvětlení k obrázkům 3-2 a 3-3:

- 1,2 – brzdové destičky
- 3,4 – přípravky nahrazující brzdový kotouč
- 5 – tenzometry LCMKD-5KN
- 6 – píst brzdy
- 7 – brzdový třmen

Na (obrázku 3-3), je jasně patrný ohyb třmenu při zatížení, ke kterému dochází postupně při zvyšování tlaku na píst tlačící na brzdovou destičku. A je na něm též vidět odlehčení horních tenzometrů při této zátěži, což je samozřejmě i patrné z přiloženého grafu 1.



Obr. 3-3 – třmen brzdy v zatížení

Aby mohlo dojít k porovnání obou metod měření musíme sečíst výsledné hodnoty naměřené na všech čtyřech tenzometrech. Po sečtení těchto hodnot jsme je přímo porovnali s hodnotami naměřenými kalibračním tenzometrem a zjistili jsme, že naměřené hodnoty jsou stejné a až při síle 10kN dochází k naměření nepatrně vyšších hodnot metodou čtyř tenzometrů, což je jasně patrné z Grafu 2. Jedná se o očekávaný a pochopitelný jev, protože touto metodou jsme schopni omezit vliv ohnutí brzdového třmenu. Protože při metodě měření pomocí jednoho tenzometru dochází k působení sil mimo osu tohoto tenzometru. A to do měření vnáší značné nepřesnosti.

6. Závěr

V této práci jsem se seznámil s používanými systémy, které jsou využívány pro měření ve firmě Lucas Autobrzdý s.r.o. K seznámení jsem využil naměřená data z různých zkoušek a měření. Po řádném nastudování používaných metod, jsem navrhl koncepční řešení pro nový měřicí systém, který zefektivnil způsob a přesnost měření. Jedná se o měření svěrných sil pomocí 4 tenzometrů.

Navrhli jsme a sestavili měřicí systém, který je schopen měřit zároveň na čtyřech tenzometrech a v reálném čase ukládat naměřené hodnoty do PC. Tento systém jsme zkalibrovali a provedli na něm řadu měření. Tyto data se později využijí pro detailní prostudování naměřených hodnot. Tím jsme schopni přesného porovnání mezi oběma metodami měření a zjistit která z metod je výhodnější a přesnější.

Zjistili jsme, že nová metoda, měření svěrných sil mezi brzdovými destičkami pomocí čtyř tenzometrů klade větší důraz na přesnost měřicího kompletu, než předešlá metoda pomocí jednoho tenzometru. Ale za to přináší přesnější výsledky měření, což je určitě pozitivní výsledek.

Metodou měření pomocí čtyř tenzometrů je nejen možné přesně zjistit velikost svěrné síly, ale je také možné zjistit velikost ohybu třmenu, což je také důležité a je možné touto metodou odhalit velice rychle chybu ve výrobě. Pokud by totiž byl vyroben třmen ze špatného materiálu, který je nevyhovující pro použití v praxi, bude touto metodou velice rychle změřen větší ohyb třmenu což se projeví větším zatížením spodních tenzometrů a menším zatížením horních tenzometrů. To znamená, že při zkouškách stačí sledovat poměr sil mezi těmito tenzometry a tím bezpečně zjistit kvalitu materiálu použitého při výrobě brzdového třmenu.

Použitá literatura

- [1] <http://www.omegadyne.com>
- [2] <http://www.ni.com>
- [3] <http://www.omegaeng.cz>
- [4] <http://www.sila.cz>
- [5] <http://www.vslib.cz>